



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

TALITA FERNANDA CARVALHO GENTIL

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUO MINERAL DA EXPLORAÇÃO DE
ESMERALDAS EM MASSA CERÂMICA: CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA
E QUÍMICA, FORMULAÇÃO E POTENCIAL TECNOLÓGICO**

FORTALEZA

2024

TALITA FERNANDA CARVALHO GENTIL

APROVEITAMENTO DE RESÍDUO MINERAL DA EXPLORAÇÃO DE
ESMERALDAS EM MASSA CERÂMICA: CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA
E QUÍMICA, FORMULAÇÃO E POTENCIAL TECNOLÓGICO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito final à obtenção do título de Doutora em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. José de Araújo Nogueira Neto.

Coorientador: Prof. Dr. Erlon Rabelo Cordeiro.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G295a Gentil, Talita Fernanda Carvalho.

Aproveitamento de resíduo mineral da exploração de esmeraldas em massa cerâmica: caracterização mineralógica e química, formulação e potencial tecnológico / Talita Fernanda Carvalho Gentil. – 2024.
174 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. José de Araújo Nogueira Neto.

Coorientação: Prof. Dr. Erlon Rabelo Cordeiro.

1. Reutilização mineral. 2. Caracterização de materiais cerâmicos. 3. Garimpo de esmeralda. I. Título.

CDD 551

TALITA FERNANDA CARVALHO GENTIL

APROVEITAMENTO DE RESÍDUO MINERAL DA EXPLORAÇÃO DE
ESMERALDAS EM MASSA CERÂMICA: CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA
E QUÍMICA, FORMULAÇÃO E POTENCIAL TECNOLÓGICO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito final à obtenção do título de Doutora em Geologia. Área de concentração: Geodinâmica e Recursos Minerais.

Aprovada em: 03/10/2024.

BANCA EXAMINADORA

Professor Dr. José de Araújo Nogueira Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Professora Dra. Irani Clezar Mattos (Membro Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Professora Dra. Martha Noélia Lima (Membro Externo)
Universidade Federal de Goiás (UFG)

Professor Dr. Tércio Graciano Machado (Membro Externo)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA)

Dr. Vinícius Ferraz Guimarães (Membro Externo)
Universidade Federal de Goiás (UFG)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará, através do PPGG, pela oportunidade de cursar o Doutorado em Geologia e pelo suporte financeiro para visitas técnicas.

Ao Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) pelo suporte técnico e realização das análises térmicas, químicas e mineralógicas das amostras.

Ao grupo de pesquisa Automação, Eficiência Energética e Produção do IFBA – *Campus Jacobina*, pelo apoio e suporte técnico no desenvolvimento deste projeto.

Aos Laboratórios de Degradação e Estabilização e Compostos (LabDEC) e de Ensaio Mecânicos da Universidade de Brasília (UnB) pelo suporte nos ensaios tecnológicos.

À minha família, por todo apoio ao longo da minha vida acadêmica, profissional e pessoal e pela IMENSA paciência demonstrada durante o desenvolvimento dessa pesquisa (Sueli, Wallace, Patrícia, Alice e José Flávio).

Ao Professor Dr. José de Araújo Nogueira Neto, agradeço por ter aceitado me orientar e por sua constante presença e apoio ao longo de quase toda a minha trajetória acadêmica e profissional. Sou profundamente grata pelos conhecimentos compartilhados e pelos momentos descontraídos durante as nossas reuniões on-line, que enriqueceram tanto o aprendizado quanto a experiência deste doutorado.

A amiga Professora Dra. Naedja Vasconcelos Pontes, pela amizade, incentivo e apoio no meu aprimoramento acadêmico, a quem devo grande respeito e especial gratidão.

Aos amigos e organizadores do GPAEP-JAC, os Doutores Beliato, Jonei, Raimison e Tércio, pela amizade, pelos momentos de descontrações, dedicação e colaboração no desenvolvimento dessa pesquisa.

A amiga Herdivânia Sousa, parceira de pós-graduação, pela amizade, pela colaboração e por passarmos juntas os perrengues das disciplinas e desenvolvimento dessa pesquisa no período da pandemia.

Aos amigos Agnaldo, Joel, Diones e Leal, por sempre estarem dispostos a colaborar com o desenvolvimento desta pesquisa e de tantos outros.

Aos amigos e amigas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a pesquisa realizada ao longo deste doutorado, agradeço profundamente pelo impacto significativo que tiveram em minha formação acadêmica e pessoal.

Muito Obrigada!!!

"O maior desafio de nosso tempo é transformar a escassez em abundância por meio da inovação e do uso responsável dos recursos." (AMORY LOVINS, 1999).

RESUMO

A exploração de depósitos de esmeraldas na região nordeste do estado da Bahia é conduzida de maneira desordenada em áreas de garimpo, frequentemente sem a realização de estudos geológicos prévios ou supervisão técnica específica durante o processo de extração mineral. Esta prática culmina em notáveis passivos ambientais para a região. Este estudo focaliza-se na identificação de aplicações significativas para os resíduos resultantes dessa exploração, com ênfase nos setores da construção civil e cerâmica. O intuito é conferir valor a tais resíduos, exemplificado pelo subproduto mineral proveniente da exploração de esmeraldas, integrando-o como componente em cerâmicas destinadas à produção de blocos, tijolos, telhas especiais, entre outros. A incorporação desses resíduos em processos produtivos sustentáveis representa um avanço significativo em direção a uma abordagem mais equilibrada e eficiente no setor de mineração. Portanto, com o objetivo de unir experiências e informações técnicas que contribuam para o desenvolvimento sustentável, proporcionando benefícios relevantes ao setor da construção civil e à sociedade em geral, esta pesquisa investiga a incorporação do resíduo proveniente da exploração de esmeraldas em matrizes cerâmicas, variando os percentuais de 10, 20, 30, 40 e 50 %. O estudo abrange avaliações das composições químicas, mineralógicas, térmicas bem como comportamentos de intensidade do brilho, ópticos, físicos e mecânicos. As matérias-primas foram caracterizadas por meio de técnicas analíticas, incluindo fluorescência de raios X, difração de raios X, ensaios de perda de intensidade do brilho e análises colorimétricas. Os corpos de prova foram conformados e submetidos à queima em diferentes temperaturas (850, 900, 1000, 1100, 1200 °C) com isoterma de 1 hora e taxa de aquecimento de 10 °C/min. Diversos ensaios tecnológicos foram conduzidos, abrangendo Retração Linear de Queima, Perda ao Fogo, Absorção de Água, Porosidade Aparente e Massa Específica Aparente. Os resultados revelaram que a incorporação do resíduo da exploração de esmeralda na massa cerâmica resultou em um produto final com propriedades tecnológicas que atendem às normas técnicas para utilização nos setores civil e cerâmico. Notadamente, os percentuais de 10 % a 20 % de resíduos demonstraram os resultados aceitáveis.

Palavras-chave: reutilização mineral; caracterização de materiais cerâmicos; garimpo de esmeralda.

ABSTRACT

The exploitation of emerald deposits in the northeastern region of Bahia is carried out in an unregulated manner in mining areas, often without prior geological studies or specific technical supervision during the mineral extraction process. This practice results in significant environmental liabilities for the region. The present study focuses on identifying viable applications for the waste generated from this mining activity, with emphasis on the construction and ceramics sectors. The aim is to add value to such waste, specifically the mineral by-product from emerald mining, by incorporating it as a component in ceramics for the production of blocks, bricks, special tiles, and other products. The integration of this waste into sustainable production processes represents a significant advancement towards a more balanced and efficient approach in the mining sector. Thus, with the goal of combining experience and technical information to contribute to sustainable development and offer significant benefits to the construction sector and society, this research investigates the incorporation of waste from emerald mining into ceramic matrices, varying the incorporation levels at 10, 20, 30, 40, and 50 %. The study encompasses evaluations of the chemical, mineralogical, and thermal compositions, as well as the behavior of gloss intensity, optical, physical, and mechanical properties. The raw materials were characterized using analytical techniques, including X-ray fluorescence, X-ray diffraction, gloss intensity loss tests, and colorimetric analyses. The test specimens were formed and subjected to firing at different temperatures (850, 900, 1000, 1100, and 1200 °C) with a 1-hour isotherm and a heating rate of 10 °C/min. Several technological tests were conducted, including Linear Firing Shrinkage, Loss on Ignition, Water Absorption, Apparent Porosity, and Apparent Specific Mass. The results revealed that the incorporation of emerald mining waste into ceramic mass produced a final product with technological properties that meet the technical standards for use in the construction and ceramics sectors. Notably, incorporation levels between 10 % and 20 % demonstrated acceptable results.

Keywords: mineral reutilization; characterization of ceramic materials; emerald mining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Visão panorâmica do resíduo da exploração de esmeralda descartado de forma irregular nos garimpos de Socotó e Carnaíba.....	16
Figura 2 -	Mapa de localização geográfica das áreas de estudo na Serra da Jacobina e imagens dos garimpos de Socotó e Carnaíba e da jazida de Argila no Distrito de Umbuzeiro.....	21
Figura 3 -	Mapa das unidades geotectônicas predominantes no embasamento do Cráton do São Francisco na Bahia.....	23
Figura 4 -	Mapa simplificado do estado da Bahia destacando os domínios tectônicos-geocronológicos Arqueanos e Paleoproterozóicos.....	25
Figura 5 -	Mapa geológico simplificado da Serra da Jacobina e adjacências.....	26
Figura 6 -	Representação cartográfica das características geológicas na área de Carnaíba.....	31
Figura 7 -	Ilustração esquemática da seção geológica transversal na Região de Carnaíba.....	32
Figura 8 -	Representação esquemática da distribuição completa em um filão mineralizado, desde o núcleo quartzoso até o serpentinito encaixante.....	33
Figura 9 -	Mapa geológico do Garimpo de Socotó.....	35
Figura 10 -	Ilustração esquemática da seção geológica A-B no garimpo de Socotó.....	35
Figura 11 -	Galeria de Extração de Esmeralda.....	38
Figura 12 -	Em (A) resíduo que sobra das escavações (ensacados), chamados localmente de “arroio”; em (B), (D) e (E) quiijeiros realizando a lavagem do resíduo da esmeralda, e; (C) e (F) resíduo com teor baixo de minério.....	39
Figura 13 -	Resíduos provenientes da extração de esmeraldas descartados de maneira inadequada na região de Carnaíba, em Pindobaçu-BA.....	40
Figura 14 -	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030.....	41
Figura 15 -	Percentual de pesquisas realizadas com a adição de resíduos minerais nas Pós-Graduações brasileiras no período de 2018 a 2022.....	44
Figura 16 -	Fluxograma de organização do trabalho para execução da pesquisa.....	48
Figura 17 -	Em (A) coleta da argila no Distrito de Umbuzeiro-BA, e, em detalhe, a argila in situ; (B) coleta do resíduo de exploração da esmeralda no	

	garimpo de Socotó em Campo Formoso, e (C) Forma de armazenamento das amostras.....	49
Figura 18 -	Em (A) Tratamento no almofariz da argila e dos resíduos minerais e (B) Resíduo de esmeralda no moinho de bolas para o processo de cominuição.....	52
Figura 19 -	Em (A) Processo de peneiramento da argila e dos resíduos minerais e (B) material retido e passante na peneira nº 200.....	53
Figura 20 -	Em (A) Mistura e homogeneização das matérias-primas; (B) quantificação de cada amostra por formulação, e; (C) armazenamento das amostras já umedificadas.....	54
Figura 21 -	Em (A) e (B) temos o processo de conformação por prensagem das amostras, e em (C) matriz metálica utilizada para conformação dos corpos de prova.....	54
Figura 22 -	Em (A) secagem das amostras após o processo de compactação, e (B) pesagem e medição dos corpos de prova antes da queima.....	55
Figura 23 -	Avaliação da intensidade do brilho nas amostras analisadas.....	59
Figura 24 -	Avaliação colorimétrica nas amostras examinadas.....	60
Figura 25 -	Em (A) são registradas as medições de comprimento; (B) são realizadas as medições de largura; e (C) é feito o registro das medidas antes e após a queima das amostras.....	61
Figura 26 -	Execução do ensaio de absorção de água.....	62
Figura 27 -	Difratograma de raios - X com a evolução térmica e mineralógica da argila pura, antes e após a queima.....	70
Figura 28 -	Curvas de DSC e TG da argila de Umbuzeiro.....	73
Figura 29 -	Curva de MS da água evoluída (m/z = 18) da argila de Umbuzeiro.....	74
Figura 30 -	Resultado dos Limites de Atterberg projetados no gráfico de trabalhabilidade de Bain e Highly (1978) para a argila de Umbuzeiro.....	76
Figura 31 -	Coloração dos corpos de prova da argila de Umbuzeiro após o processo de queima.....	77
Figura 32 -	Diagrama de gresificação da argila de Umbuzeiro.....	77
Figura 33 -	Resistência à flexão em função da temperatura para a argila de Umbuzeiro.....	78
Figura 34 -	Análise de microestrutura (MEV) da superfície dos corpos prova	

queimados em várias temperaturas.....	80
Figura 35 - Difratoformas de raios - X da argila.....	91
Figura 36 - Difratoformas de raios - X dos resíduos da exploração de esmeralda. A) Garimpo Carnaíba; e B) Garimpo Socotó.....	92
Figura 37 - Ensaio de retração linear de queima.....	93
Figura 38 - Ensaio de absorção de água.....	95
Figura 39 - Ensaio de porosidade aparente.....	96
Figura 40 - Ensaio de resistência à flexão.....	97
Figura 41 - Difratoforma de raios - X com a evolução térmica da formulação C ₂₀ , antes e após a queima.....	98
Figura 42 - Difratoforma de raios - X com a evolução térmica da formulação S ₁₀ , antes e após a queima.....	100
Figura 43 - Curva de gresificação das formulações C ₂₀ e S ₁₀	101
Figura 44 - Resistência à flexão em função da temperatura das formulações C ₂₀ e S ₁₀ ..	101
Figura 45 - Porosidade Aparente em função da temperatura das formulações C ₂₀ e S ₁₀ .	103
Figura 46 - Curva de DSC da argila (A); da formulação com o resíduo do Garimpo Carnaíba e da formulação com o resíduo do Garimpo Socotó. (* = ustulação do molibdênio).....	114
Figura 47 - Curva de TG da argila (A); da formulação com o resíduo de Carnaíba e da formulação com o resíduo de Socotó	114
Figura 48 - Curva de MS da água evoluída (m/z = 18) da argila (A), da formulação com resíduo de Carnaíba e da formulação com o resíduo de Socotó.....	115
Figura 49 - Curva de MS do SO ₂ evoluída (m/z = 64) da argila (A), da formulação com resíduo de Carnaíba e da formulação com o resíduo de Socotó.....	116
Figura 50 - Curvas de DSC e TG do resíduo de esmeraldas do Garimpo de Carnaíba....	117
Figura 51 - Difratoforma de raios - X com a evolução térmica e mineralógica da argila pura, antes e após a queima.....	118
Figura 52 - Difratoformas de raios - X dos resíduos de esmeralda do garimpo de carnaíba e do garimpo de socotó.....	119
Figura 53 - Difratoforma de raios - X com a evolução térmica da formulação C ₂₀ , antes e após a queima.....	120
Figura 54 - Difratoforma de raios - X da formulação S ₁₀ com evolução térmica.....	122
Figura 55 - Intensidade do brilho das amostras A, C ₂₀ e S ₁₀ em diferentes temperaturas	

	de queima.....	124
Figura 56 -	Coloração dos corpos de prova após o processo de queima (temperaturas de queima: 850, 900, 950, 1000, 1100 e 1200 °C).....	125
Figura 57 -	Análise cromática das amostras A, C ₂₀ e S ₁₀ no espaço colorimétrico. Após tratamento térmico a 850 °C em (A) e a 900 °C em (B).....	126
Figura 58 -	Análise cromática das amostras A, C ₂₀ e S ₁₀ no espaço colorimétrico. Após tratamento térmico a 950 °C em (A) e a 1000 °C em (B).....	127
Figura 59 -	Análise cromática das amostras A, C ₂₀ e S ₁₀ no espaço colorimétrico. Após tratamento térmico a 1100 °C em (A) e a 1200 °C em (B).....	127
Figura 60 -	Variação do parâmetro L* em função do percentual dos óxidos de Fe ₂ O ₃ + TiO ₂ e da temperatura.....	129
Figura 61 -	Variação de quantidade de Fe ₂ O ₃ + TiO ₂ e MoO ₃ nas amostras estudadas...	130
Figura 62 -	Variação total da cor (ΔE) em função do percentual de óxidos de Fe ₂ O ₃ + TiO ₂ e da temperatura.....	131

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Uma visão sobre o desenvolvimento de pesquisas no Brasil relacionadas ao uso de resíduos minerais nas últimas duas décadas.....	45
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Composição e nomenclatura das formulações.....	51
Tabela 2 -	Composição química das matérias-primas estudadas.....	71
Tabela 3 -	Composição e nomenclaturas das formulações.....	87
Tabela 4 -	Composição química das matérias-primas estudadas.....	89
Tabela 5 -	Análises de enxofre e carbono elementares das matérias-primas.....	90
Tabela 6 -	Composição química das matérias-primas estudadas.....	112
Tabela 7 -	Análises de enxofre e carbono elementares das matérias-primas.....	113
Tabela 8 -	Dados em porcentagem obtidos do ensaio de intensidade do brilho das amostras estudadas.....	123

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Estrutura da Tese.....	18
1.2	Objetivos.....	19
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>19</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>19</i>
1.3	Localização da área de estudo.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	Síntese da Geologia das Esmeraldas.....	22
<i>2.1.1</i>	<i>Geologia Regional - Cráton do São Francisco.....</i>	<i>22</i>
<i>2.1.1.1</i>	<i>Bloco Gavião.....</i>	<i>24</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Geologia Local – Garimpo Carnaíba e Garimpo Socotó.....</i>	<i>30</i>
<i>2.1.2.1</i>	<i>Garimpo de Carnaíba.....</i>	<i>30</i>
<i>2.1.2.2</i>	<i>Garimpo de Socotó.....</i>	<i>34</i>
2.2	Aspectos da Extração de Esmeralda na Serra da Jacobina.....	36
2.3	Incorporação Sustentável para os Resíduos Minerais.....	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1	Levantamento Bibliográfico.....	48
3.2	Atividade de Campo.....	49
3.3	Trabalhos Experimentais.....	50
<i>3.3.1</i>	<i>Procedimento Experimental da Massa Cerâmica.....</i>	<i>50</i>
<i>3.3.2</i>	<i>Preparação das Matérias-Primas.....</i>	<i>52</i>
<i>3.3.3</i>	<i>Formulação dos Corpos de Prova.....</i>	<i>53</i>
<i>3.3.4</i>	<i>Processos Térmicos.....</i>	<i>55</i>
<i>3.3.5</i>	<i>Caracterização das Matérias-Primas.....</i>	<i>56</i>
<i>3.3.6</i>	<i>Análise da Coloração.....</i>	<i>58</i>
<i>3.3.7</i>	<i>Ensaio Tecnológicos.....</i>	<i>60</i>
4	ANÁLISE MULTIDIMENSIONAL DA ARGILA DE UMBUZEIRO-BA: PROPRIEDADES MINERALÓGICA, FÍSICO-QUÍMICA E TECNOLÓGICA PARA USO CERÂMICO.....	65
4.1	Introdução.....	66
4.2	Materiais e Métodos.....	67
<i>4.2.1</i>	<i>Caracterização da argila.....</i>	<i>68</i>

4.2.2	<i>Preparação e estudo das propriedades dos corpos de prova cerâmicos.....</i>	69
4.3	Resultados e Discussão.....	70
4.3.1	<i>Análise mineralógica e química.....</i>	70
4.3.2	<i>Análise térmica.....</i>	72
4.3.3	<i>Propriedades tecnológicas.....</i>	75
4.4	Conclusões.....	80
5	RESÍDUO DA EXTRAÇÃO DE ESMERALDAS: ANÁLISE MINERALÓGICA E POTENCIAL TECNOLÓGICO EM APLICAÇÕES NA COMPOSIÇÃO DE MASSAS CERÂMICAS.....	85
5.1	Introdução.....	86
5.2	Materiais e Métodos.....	87
5.3	Resultados e Discussões.....	88
5.4	Conclusões.....	103
6	AVALIAÇÃO DE COR E BRILHO EM AMOSTRAS CERÂMICAS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO MINERAL DA EXTRAÇÃO DE ESMERALDAS DOS GARIMPOS DE CARNAÍBA E SOCOTÓ, NORDESTE DA BAHIA.....	108
6.1	Introdução.....	109
6.2	Materiais e Métodos.....	110
6.3	Resultados e Discussões.....	111
6.3.1	<i>Caracterização das Matérias-Primas.....</i>	111
6.3.2	<i>Intensidade do Brilho.....</i>	123
6.3.3	<i>Análise Colorimétrica.....</i>	125
6.4	Conclusões.....	131
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	137
7.1	Conclusões.....	137
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	139
	REFERÊNCIAS.....	140
	APÊNDICE A – ENSAIO TECNOLÓGICOS DAS FORMULAÇÕES.....	151
	APÊNDICE B – COLORIMETRIA DAS FORMULAÇÕES.....	173
	APÊNDICE C – GRANULOMETRIA E PLASTICIDADE DA ARGILA.....	174

1 INTRODUÇÃO

É notório que a exploração mineral desempenha um papel importante no respaldo financeiro e econômico do Brasil. Atualmente a atividade de extração mineral é reconhecida como uma significativa fonte de receita que desempenha um papel decisivo no equilíbrio dos índices de crescimento do país. Essa relevância é particularmente evidente ao considerarmos o potencial do solo brasileiro, caracterizado por configurações notáveis e uma riqueza que o coloca à frente, mantendo uma comparação equilibrada com outras nações em desenvolvimento (IBRAM, 2023).

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM, o termo “mineração” engloba todos os processos e atividades industriais destinados à extração de substâncias minerais do solo, seja por meio de perfuração ou contato com áreas de depósitos minerais. A atividade mineral mantém uma relação intrínseca, em maior ou menor grau, com todos os fenômenos sociais e está vinculada a questões cruciais de crescimento e desenvolvimento do país. No entanto, é alvo de amplo debate e críticas, dado que seus impactos ambientais são consistentemente expressivos; incluindo a exploração indiscriminada que resulta na diminuição do potencial de produção e no acesso restrito a certos tipos de materiais, cujo desenvolvimento é notavelmente lento e controlado.

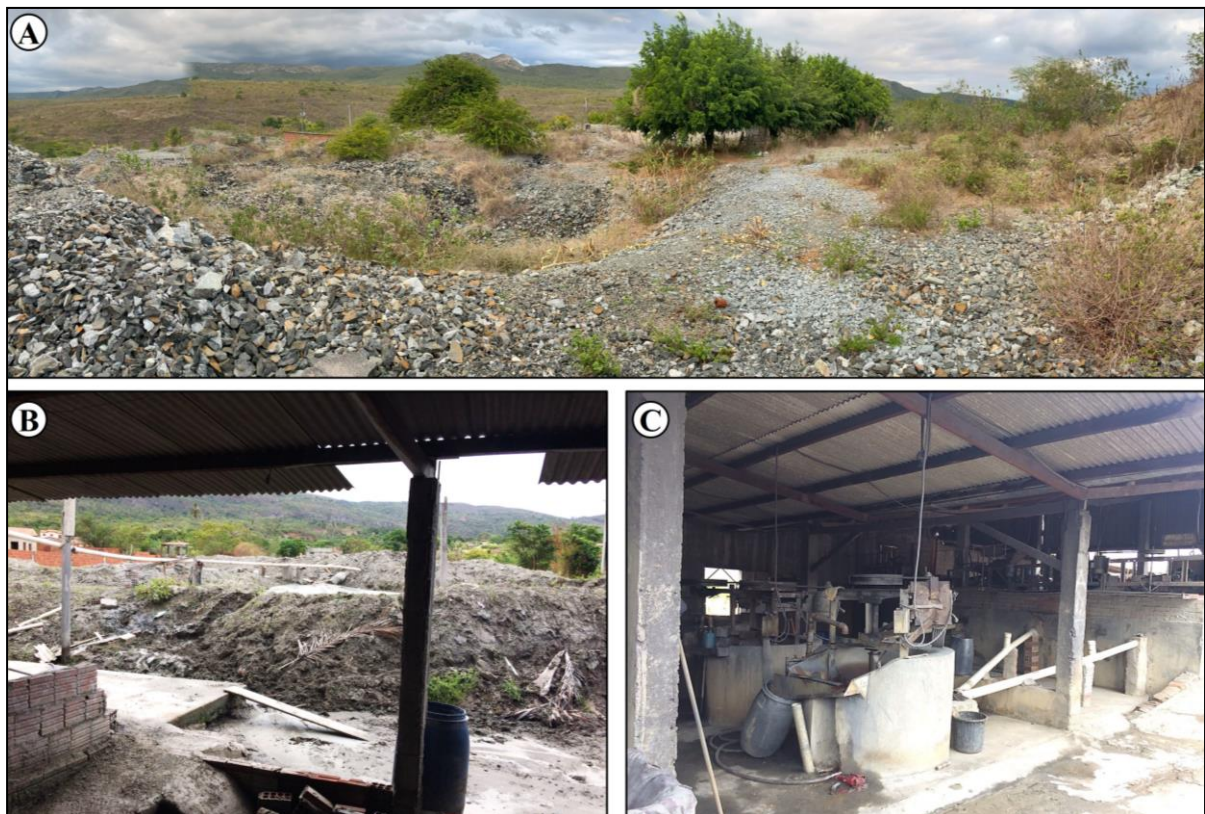
É manifesta a correlação dos efeitos ambientais com as diversas fases da exploração de recursos minerais. Isso abrange desde a abertura da cava, que envolve a retirada da vegetação, escavações, movimentação de terra e modificação da paisagem local, até o uso de explosivos no desmonte de rochas, resultando em sobrepressão atmosférica, vibração do terreno, lançamento de fragmentos, emissão de gases, poeira e ruídos; dentre outros aspectos. O transporte e beneficiamento do minério também contribuem para a geração de poeira e ruídos. Estes impactos afetam diretamente os elementos ambientais como água, solo e ar; bem como a população local (MECHI; SANCHES, 2010).

Apesar disso, compreendemos que interromper a exploração mineral não é uma opção viável, dada a valiosa contribuição de seus produtos para a sociedade. No entanto, é imperativo conduzir essa exploração de forma responsável e sustentável a fim de prevenir a degradação ambiental ou, pelo menos, minimizar ao máximo seus impactos. Essa abordagem requer o desenvolvimento de novas tecnologias para otimizar o aproveitamento dos recursos minerais, aliado a uma conscientização aprimorada por parte dos empreendedores, assegurando assim um ambiente ecologicamente equilibrado (MACHADO, 2012).

A exploração das jazidas de esmeraldas na região nordeste do estado da Bahia ocorre de forma desorganizada por cooperativas de garimpeiros, geralmente sem a aplicação de estudos geológicos anteriores ou supervisão técnica específica durante o processo de extração das gemas. Tal prática resulta em significativos passivos ambientais para a região, além de não proporcionar o retorno financeiro esperado.

Cavalcante (2010) relata que uma planta beneficiadora foi implantada em 2008 no Garimpo de Carnaíba, localizado no município de Pindobaçu-BA, em uma fase experimental. Essa iniciativa contou com a participação de empresas estrangeiras e visava a extração de molibdênio e da flogopita. Durante as visitas técnicas aos locais e ao registrar imagens fotográficas, conforme mostra a Figura 1, é possível testemunhar a operação ativa da planta beneficiadora.

Figura 1 – Em (A) visão panorâmica do resíduo da exploração de esmeralda descartado de forma irregular no Garimpo de Socotó; (B) resíduo da esmeralda após ser processado para retirada do molibdênio em uma residência, e; (C) destaca uma seção da planta beneficiadora instalada para retirada de molibdênio no Garimpo de Carnaíba.



Fonte: Autora.

Nas áreas estudadas observa-se que os minerais não são integralmente aproveitados, resultando na desconsideração de material com valor agregado, que é

descartado nas encostas. Esse descarte contribui para a formação de grandes depósitos de resíduos, ampliando os danos ambientais, uma vez que esses materiais estão sujeitos a diversas reações ao longo do tempo de exposição às intempéries.

Apesar da ausência de estimativas quanto à produção anual de resíduos, a extração de esmeraldas nas galerias subterrâneas do Garimpo de Carnaíba em Pindobaçu-BA e do Garimpo de Socotó em Campo Formoso-BA já ultrapassa seis décadas de atividade. Essa longevidade na exploração ressalta a necessidade urgente de implementação de práticas mais eficientes e sustentáveis visando mitigar os impactos ambientais associados a essa atividade.

Alinhado à perspectiva de Machado (2012) e Ribeiro Neto (2023) sobre a reciclagem de resíduos e sua significância na formulação de políticas públicas em um contexto ambiental global, torna-se imperativo buscar alternativas inovadoras para minimizar os resíduos gerados pela exploração mineral.

O cenário projetado neste estudo surge como uma possibilidade de convergir com os princípios estabelecidos na Agenda 2030, conforme delineada pelo Governo do Distrito Federal (2022). Esta agenda estabelece um conjunto de metas orientadoras e perspectivas definidas pela Organização das Nações Unidas (ONU) com o propósito de promover a dignidade e a qualidade de vida para todos os habitantes do planeta, sem comprometer o meio ambiente e, conseqüentemente, assegurando o bem-estar das gerações futuras (GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL, 2022).

Esta pesquisa está em consonância com 5 dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos na Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU). Estes objetivos incluem as seguintes metas: Objetivo 9 - Fomento da indústria, inovação e infraestrutura, Objetivo 11 - Promoção de cidades e comunidades sustentáveis, Objetivo 12 - Estímulo ao consumo e produção responsáveis, Objetivo 15 - Conservação da vida terrestre e Objetivo 17 - Fortalecimento de parcerias e meios de implementação.

Desta forma, propomos nessa pesquisa a avaliação dos efeitos derivados da inclusão do resíduo mineral proveniente da exploração de esmeraldas como substituto da matéria-prima convencional, integrando-o como componente em formulações cerâmicas voltadas para a produção de blocos, tijolos e telhas. A incorporação desse resíduo em operações produtivas sustentáveis representa um avanço em direção a uma abordagem mais equilibrada e eficaz dentro do âmbito da indústria mineradora.

1.1 Estrutura da Tese

A presente tese adota a estrutura de artigos científicos como forma organizacional. Os resultados obtidos durante a execução da pesquisa foram consolidados em três artigos que detalham os materiais e métodos empregados, bem como as discussões e conclusões referentes às diversas técnicas aplicadas na pesquisa.

O manuscrito subsequente é delineado pelos seguintes capítulos:

- Capítulo 1: corresponde a uma introdução abrangente, onde se faz uma breve contextualização do estudo, e são apresentados os seus objetivos e as áreas alvo de estudo dessa pesquisa;

- Capítulo 2: inclui uma revisão sintetizada da literatura sobre os aspectos geológicos regionais e locais das jazidas de esmeraldas nos garimpos de Carnaíba e Socotó. Além disso, apresenta um contexto histórico sobre os resíduos minerais provenientes da extração de esmeraldas nesses garimpos, situados na região norte do estado da Bahia. Por fim, projeta correlações entre os aspectos da incorporação sustentável dos resíduos minerais e os objetivos estabelecidos na Agenda 2030 da ONU;

- Capítulo 3: abrange uma exposição detalhada sobre a metodologia empregada nesta pesquisa;

- Capítulo 4: refere-se à primeira parte dos resultados com o artigo intitulado "Análise Multidimensional da Argila de Umbuzeiro-BA: Propriedades Mineralógicas, Físico-Químicas e Tecnológicas para Uso Cerâmico", que será submetido à avaliação da revista Cerâmica. Este artigo aborda a caracterização detalhada da argila de Umbuzeiro, enfocando suas propriedades mineralógicas e físico-químicas, além de explorar seu potencial tecnológico para aplicação em produtos cerâmicos. A importância deste estudo está na possibilidade de utilizar essa argila como uma matéria-prima versátil e sustentável, ampliando suas aplicações industriais e reduzindo o impacto ambiental associado ao setor cerâmico.

- Capítulo 5: refere-se à segunda parte dos resultados com o artigo intitulado "Resíduo da Extração de Esmeraldas: Análise Mineralógica e Potencial Tecnológico em aplicações na composição de Massas Cerâmicas", que foi recentemente submetido à avaliação da revista científica Geociências do Nordeste. O referido artigo explora a caracterização mineralógica dos resíduos provenientes da extração de esmeraldas, além de investigar seu potencial tecnológico para uso em massas cerâmicas. A relevância deste estudo reside na possibilidade de aproveitamento sustentável de subprodutos da mineração, contribuindo para

o desenvolvimento de materiais cerâmicos com propriedades aprimoradas e menor impacto ambiental.

- Capítulo 6: representa a terceira parte dos resultados como o artigo intitulado "Avaliação de Cor e Brilho em Amostras Cerâmicas com Incorporação de Resíduo Mineral da Extração de Esmeraldas dos Garimpos de Carnaíba e Socotó, nordeste da Bahia", o qual foi recentemente submetido à revista científica HOLOS. O estudo apresentado no artigo investiga a coloração e o brilho de amostras cerâmicas formuladas com resíduos minerais provenientes da extração de esmeraldas nos garimpos de Carnaíba e Socotó, localizados na região nordeste da Bahia. A pesquisa visa compreender o impacto desses resíduos nas propriedades ópticas das cerâmicas, contribuindo para o desenvolvimento de materiais cerâmicos mais sustentáveis e com características estéticas aprimoradas.

- Capítulo 7: este capítulo refere-se às Conclusões da pesquisa, consolidando de forma concisa todos os resultados e interpretações apresentados nos capítulos anteriores e a Sugestões para trabalhos futuros.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O principal objetivo desta pesquisa concentra-se na caracterização tecnológica e mineralógica do resíduo mineral proveniente da extração de esmeraldas nos garimpos de Carnaíba em Pindobaçu-BA e Socotó em Campo Formoso-BA, buscando estudar a viabilidade da incorporação desse resíduo mineral em massa cerâmica, utilizando a argila da região do Distrito de Umbuzeiro – BA como base. O foco está na análise dos efeitos dessa incorporação, avaliando as propriedades físicas, químicas e tecnológicas de corpos de prova que foram queimados nas temperaturas de 850, 900, 950, 1000, 1100 e 1200 °C; com taxa de aquecimento de 10 °C/min, com isoterma de 60 minutos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Procurando atingir o objetivo geral, foram delineadas etapas específicas para a melhor organização do trabalho, a saber:

- a) Caracterização mineralógica da argila e dos resíduos da extração de esmeralda;

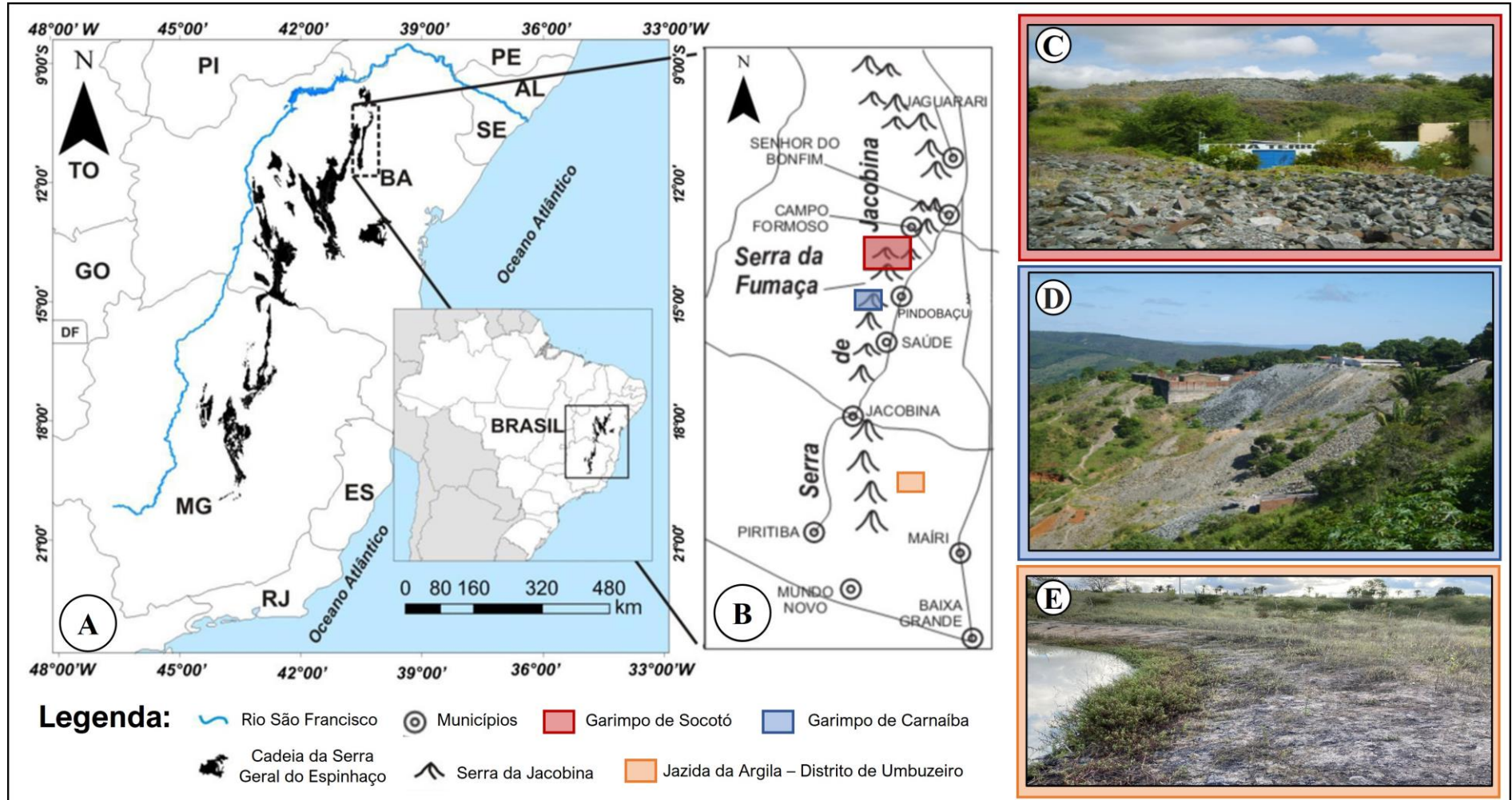
- b) Avaliação das propriedades físicas, químicas e mecânicas da argila após a incorporação do resíduo da extração de esmeralda;
- c) Verificação do efeito das diferentes temperaturas de queima na argila e nas formulações com o resíduo da extração de esmeralda;
- d) Análise dos percentuais de resíduo utilizado, visando determinar o teor mais adequado para a produção de peças cerâmicas estruturais e/ou decorativas;
- e) Análise de intensidade do brilho e colorimetria das formulações para avaliar as alterações de cores e estética, considerando a temperatura de queima e a composição química/mineralógica;
- f) Avaliação do potencial tecnológico do novo produto.

1.3 Localização da Área de Estudo

As áreas de estudo encontram-se na porção norte do Cráton do São Francisco, situado no estado da Bahia, representando uma estrutura geotectônica estabilizada durante o período Paleoproterozóico (2.0 Ga). Este período sucedeu ao evento orogénico que resultou na fusão de quatro paleocontinentes constituintes - Bloco Gavião, Bloco Jequié, Bloco Serrinha e o Cinturão Itabuna-Salvador-Curaçá; como documentado por Barbosa e Sabaté (2003). A delimitação desses blocos foi posteriormente redefinida pela orogênese Brasileira (0.6 Ga).

As amostras dos resíduos de esmeraldas foram coletadas em dois garimpos localizados na Serra da Jacobina, situada na região norte do estado da Bahia: (1) Garimpo de Carnaíba, no município de Pindobaçu – BA e (2) Garimpo de Socotó, no município de Campo Formoso - BA. Por outro lado, as amostras de argila utilizadas na formulação dos corpos de prova foram provenientes do depósito da Fazenda Caldeirão da Errada, no Distrito de Umbuzeiro – BA, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Mapa de localização geográfica das áreas de estudo (A) inseridas na Serra da Jacobina (B) e imagens representativa dos garimpos de Socotó (C), garimpo de Carnaíba (D) e a Jazida de Argila da Faz. Caldeirão da Errata no Distrito de Umbuzeiro (E).



Fonte: Mapas adaptado do IBGE (2007); CPRM (2000) e imagens da autora.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo propõe uma revisão concisa da literatura, iniciando pela exposição das características geológicas relacionadas à exploração de esmeraldas nos garimpos de Carnaíba e Socotó, localizados na região norte da Chapada Diamantina, na Bahia. Em seguida foi abordada a contextualização histórica dos resíduos minerais provenientes da extração de esmeraldas nesses garimpos e, por fim, apresentou-se as correlações entre os aspectos da incorporação sustentável dos resíduos minerais e os objetivos estabelecidos na Agenda 2030. O propósito foi estabelecer uma conexão entre o conhecimento existente na literatura e as informações obtidas durante a execução desta pesquisa.

2.1 Síntese da Geologia das Esmeraldas

No estado da Bahia situam-se estratégicos depósitos de esmeralda, destacando-se notavelmente o garimpo de Carnaíba, no município de Pindobaçu, e o garimpo de Socotó, em Campo Formoso. Essas áreas localizam-se ao longo da Serra da Jacobina, sendo importantes sítios de exploração mineral. A mineralização ocorre predominantemente em veios pegmatóides plagioclásicos e/ou nos flogopititos encaixantes, além de veios de quartzo; caracterizando uma complexa interação geológica (ASCOM/SDE, 2020).

Neste contexto observam coexistência de minerais associados à berilo industrial e berilo gemológico nas variedades de esmeralda e água-marinha, como a flogopita, molibdenita, scheelita, talco, entre outros. Tanto no Garimpo de Carnaíba como no Garimpo de Socotó, o ambiente geológico é caracterizado por um batólito granítico em contato com os terrenos migmatizados do embasamento. A compreensão desses depósitos demanda uma análise aprofundada das condições geológicas que propiciam a formação dessas valiosas gemas e seus minerais correlatos, destacando-se como um campo de estudo significativo para a compreensão da evolução geológica e mineralógica da região.

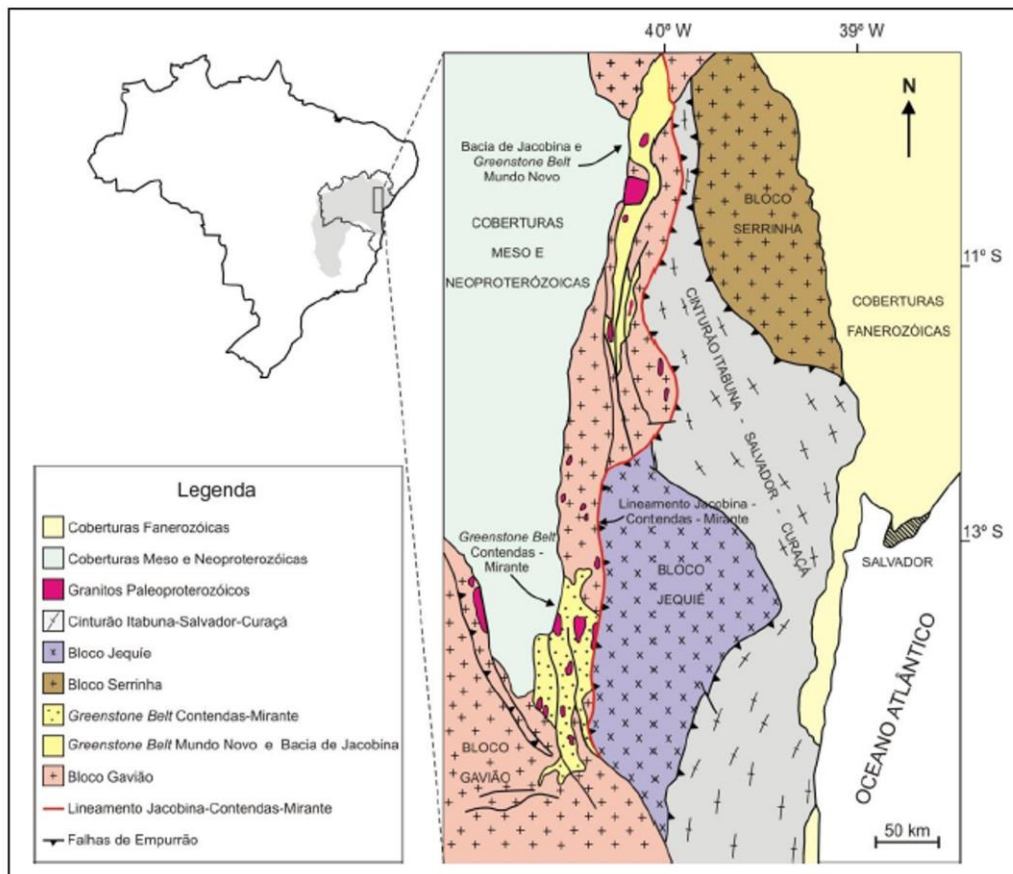
Dessa forma, apresenta-se a seguir uma síntese da geologia da região, acompanhado de uma concisa análise do Cráton do São Francisco, com enfoque em seus blocos rochosos Arqueanos. Essa abordagem visa proporcionar uma compreensão mais aprofundada do contexto geológico subjacente.

2.1.1 Geologia Regional - Cráton do São Francisco

A gênese geológica das áreas de garimpo em estudo encontra-se intrinsecamente vinculadas as unidades do embasamento Arqueano-Paleoproterozóico (2.0 Ga) do Crátón do São Francisco, no estado da Bahia; conforme descrito por Almeida em suas obras de 1967 e 1977.

Este Crátón preserva uma extensa cronologia de acreção crustal, conduzindo à interação entre protocontinentes, notadamente o Bloco Gavião, Bloco Jequié, Bloco Serrinha e o Cinturão Itabuna-Salvador-Curaçá, no intervalo temporal entre 2.2 e 1.8 Ga (BARBOSA; SABATÉ, 2004; BARBOSA *et al.*, 2003; TEIXEIRA *et al.*, 2001; LEDRU *et al.*, 1994). Ademais, seus contornos foram redefinidos pela Orogenia Brasileira (0.6 Ga), com faixas móveis circundantes evidenciadas na Figura 3.

Figura 3 – Mapa das unidades geotectônicas predominantes no embasamento do Crátón do São Francisco na Bahia, juntamente com a representação da Bacia de Jacobina e do Greenstone Belt Mundo Novo nesse contexto.



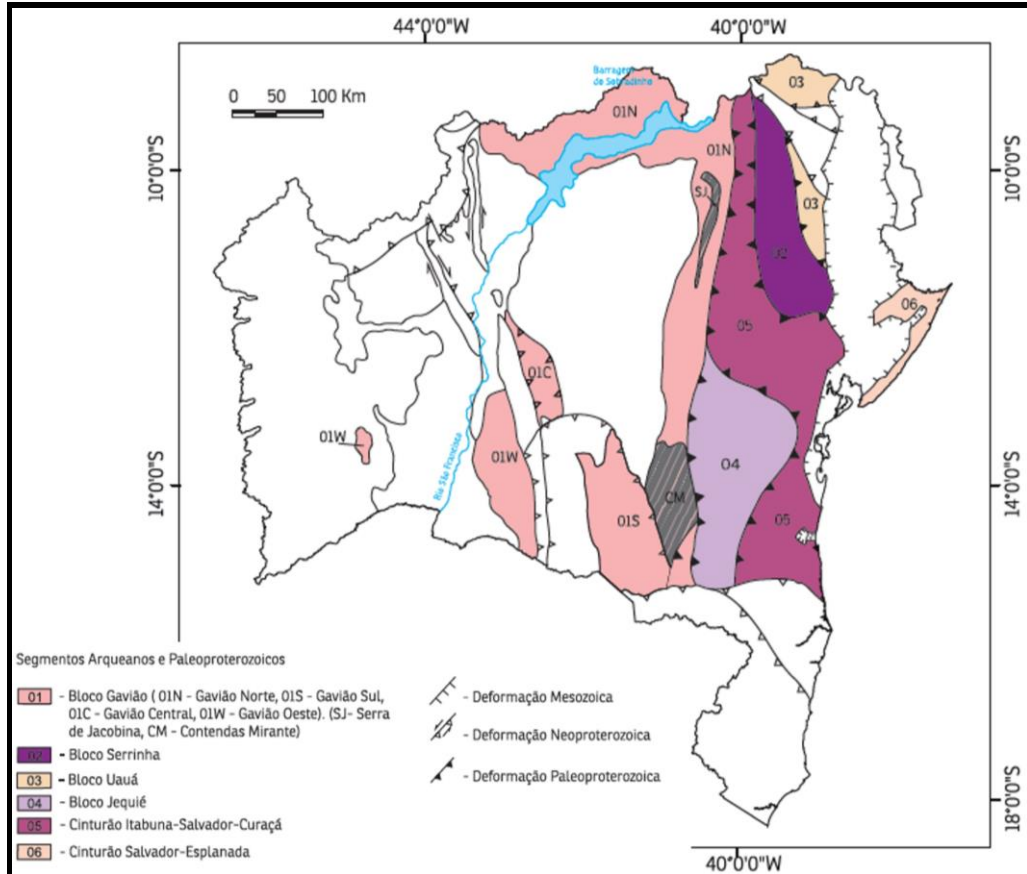
Fonte: Teles (2013, p. 24).

A interação entre os blocos com a colisão Paleoproterozóica conduziu à formação de um amplo lineamento conhecido como Lineamento Contendas-Jacobina-Mirante (SABATÉ *et al.*, 1990), que estende-se por mais de 600 km, aproximadamente na direção norte-sul. Ao longo desse lineamento, como mostra a Figura 3, são frequentemente identificadas estruturas de cavalgamento com movimento de leste para oeste, acompanhadas por intrusões graníticas peraluminosas, cujas idades Rb/Sr são datadas em 1974 ± 36 e 1883 ± 87 Ma (SABATÉ *et al.*, 1990). Este lineamento é interpretado como uma geossutura que delimita os blocos arqueanos envolvidos nesse evento. As unidades litológicas presentes nas áreas de estudo localizam-se no Bloco Gavião. E, a seguir, será apresentada uma descrição sumarizada das principais unidades litológicas que compõem esse bloco.

2.1.1.1 Bloco Gavião

Investigações realizadas por Barbosa *et al.* (2012) conduziram à identificação de uma subdivisão no Bloco Gavião, a qual compreende: **Bloco Gavião (Parte Norte)**, delimitado a leste por estruturas deformacionais Paleoproterozóicas, como o Lineamento Contendas-Jacobina-Mirante, e a oeste pelas formações rochosas da parte norte da Chapada Diamantina, confinando-se à porção norte do estado da Bahia, com orientação N-S; e **Bloco Gavião (Parte Oeste, Central e Sul)**, circunscrito por estruturas deformacionais Neoproterozóicas, situadas nas porções central, oeste e sul do estado da Bahia, conforme ilustrado na Figura 4.

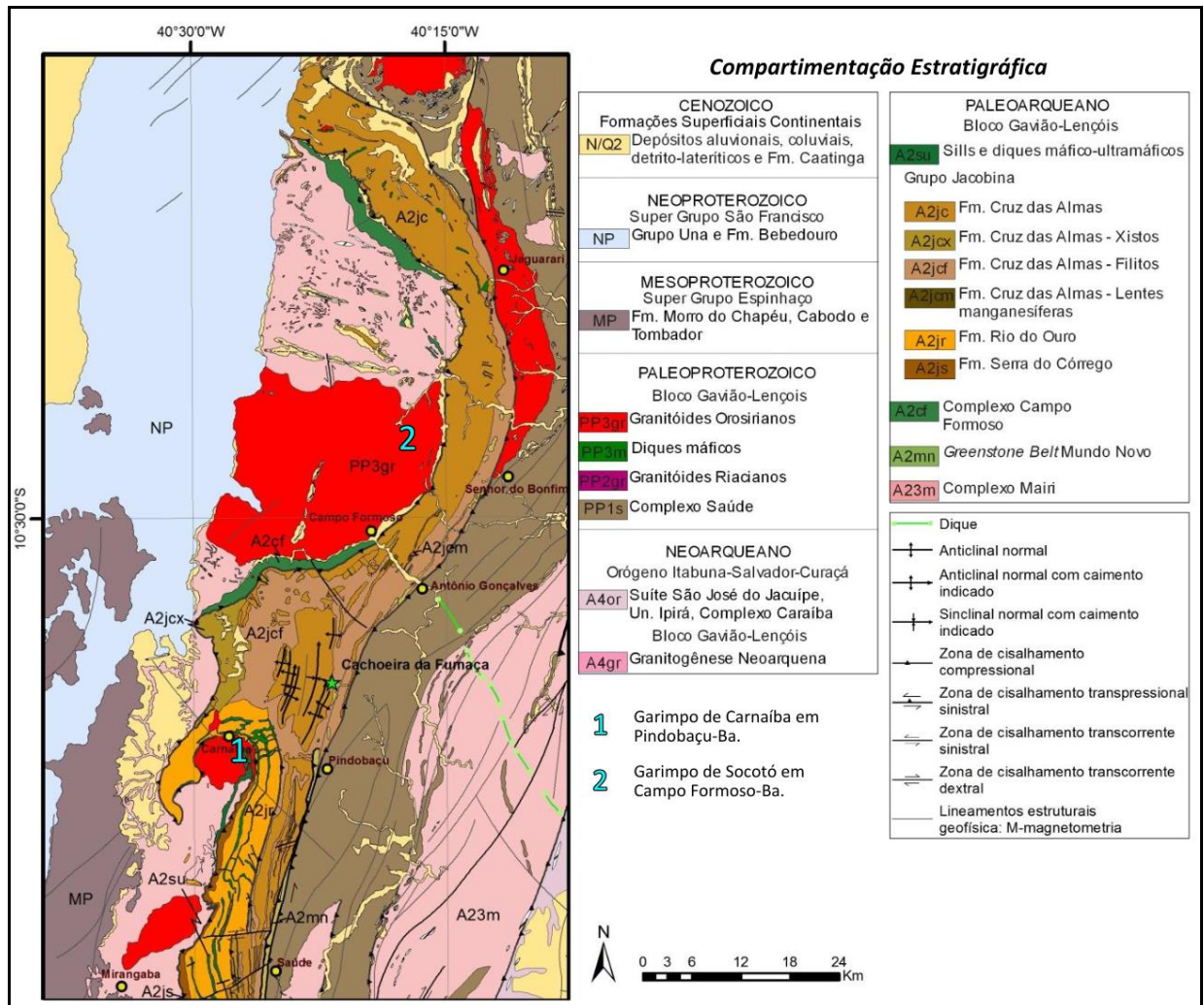
Figura 4 – Mapa simplificado do estado da Bahia destacando os domínios tectônicos-geocronológicos Arqueanos e Paleoproterozóicos. Também são apresentados os contornos das estruturas deformacionais Paleoproterozóicas, Neoproterozóicas e Mesoproterozóicas.



Fonte: Barbosa *et al.* (2012, p. 104).

Dentre as unidades litoestratigráficas do embasamento Arqueano-Paleoproterozóico da Bahia, o **Bloco Gavião (Parte Norte)** é um dos mais complexos e um dos mais estudados, principalmente por possuir diversos depósitos mineralizados como: o ouro de Jacobina, as esmeraldas de Carnaíba e Socotó, dentre outros. As diferentes unidades litológicas que compõem o **Bloco Gavião**, evidenciado na Figura 5, são descritas conforme suas idades; indo das mais velhas para as mais novas, com base na coluna Cronológica Internacional da IUGS (INTERNATIONAL UNION GEOLOGICAL SCIENCE, 1996). São elas: 1) Complexo Mairí (no Arqueano); 2) Greenstone Belt Mundo Novo (Paleoproterozóico-Arqueano); 3) Grupo Jacobina (Paleoproterozóico-Arqueano); 4) Complexo Máfico-Ultramáfico de Campo Formoso (Paleoproterozóico-Arqueano); 5) Complexo Saúde (Paleoproterozóico); 6) Granitoides (Paleoproterozóico); 7) Formações Recentes.

Figura 5 – Mapa geológico simplificado da Serra da Jacobina e adjacências.



Fonte: Modificado de Santos (2018, p. 36).

1) **O Complexo Mairí:** conforme descrito por Sampaio *et al.* (2001), é constituído por rochas TTG (tonalito-trondhjemito-granodiorito) em suas porções félsicas, e apresenta composição diorítica-gabróica nas porções máficas. Os afloramentos estão localizados a leste do Bloco Gavião, entre a Serra da Jacobina e a parte oriental da Chapada Diamantina. Essas rochas são caracterizadas pela presença de estruturas bandadas, associadas a um metamorfismo que varia de médio a alto grau, alcançando a fácies anfibolito.

Datações realizadas em ortognaisses por meio do método Pb/Pb indicam idades de 3025 ± 25 e 3040 ± 15 Ma. No entanto, de acordo com o método Sm/Nd, as datações apontam para uma idade de 3.2 Ga (PEUCAT *et al.*, 2002). Na porção leste da Serra da Jacobina, migmatitos e granitos foram datados utilizando o método Rb/Sr, revelando uma idade de 2.66 Ga (MASCARENHAS *et al.*, 1998). Datações adicionais, conduzidas em 1986 e 1991 por

meio do método Rb/Sr, resultaram em idades de 2.6 Ga e 3.0 Ga, respectivamente. Na área de Piritiba-Largo, empregando o método Rb/Sr em gnaisse, foram obtidas idades de formação em torno de 3.0 Ga (BRITO NEVES *et al.*, 1980; MELO *et al.*, 1991).

2) Greenstone Belt de Mundo Novo: o Greenstone Belt de Mundo Novo está localizado na porção nordeste do Cráton São Francisco, a leste do Bloco Gavião, entre os municípios de Ruy Barbosa e Pindobaçu. Sua presença é observada de maneira descontínua ao longo do Lineamento Contendas-Jacobina-Mirante, abrangendo uma variedade de rochas metavulcânicas básicas, félsicas, metassedimentares químicas (BIF, Cherts) e rochas clásticas. Estas rochas passaram por um metamorfismo de baixo grau, caracterizado pela fácies xistos verdes (LEO *et al.*, 1964; COUTO *et al.*, 1978).

O Greenstone Belt é categorizado por uma sequência vulcanossedimentar, dividida inicialmente em quatro domínios principais por Mascarenhas e Silva (1994): (a) Máfico – Ultramáfico (metabasaltos, calcocilicáticas, chert); (b) Vulcânico Máfico (metadacitos, piroclastos, metassedimentares); (c) Vulcânico Félsico-Sedimentar (metaandesitos, quartzo micaxisto); (d) Sedimentar. No entanto, Souza *et al.* (1996) propõe uma subdivisão do Greenstone Belt de Mundo Novo em (a) Metavulcânica Máfica (basaltos almofadados, metabasaltos andesíticos, cherts, formações ferríferas, rochas calciossilicáticas e xistos grafitosos); (b) Metavulcânica Félsica (metassedimentos piroclásticos); (c) Metassedimentares Clásticas e Químicas.

Apesar da escassez de dados geocronológicos sobre o Greenstone Belt Mundo Novo, alguns estudos foram conduzidos. Peucat *et al.* (2002) dataram os riolitos da região em 3.3 Ga, utilizando o método de U/Pb. Mais recentemente, Barbuena (2017) realizou datações por U/Pb em zircões detríticos das unidades clásticas do greenstone, encontrando idades de 2.1 Ga, associando esta unidade ao Complexo Saúde.

3) Grupo Jacobina: as primeiras menções sobre a Serra da Jacobina foram registradas pelo padre Manuel Ayres do Casal em 1817 (COUTO *et al.*, 1978). Posteriormente, outros estudos foram publicados, como o de Leo *et al.* (1964), que apresentou a primeira coluna litoestratigráfica para a Serra da Jacobina, delineando a Formação Bananeiras, a Serra do Córrego, o Rio do Ouro e Cruz das Almas. Griffon (1967), ao mapear o centro da serra, consolidou as informações de Leo *et al.* (1964), redefinindo Serra do Córrego e Rio do Ouro e subdividindo Cruz das Almas em Serra do Meio e Água Branca.

Couto *et al.* (1978) agrupou as formações Cruz das Almas, Serra do Meio e Água Branca, juntamente com o Grupo Jacobina inferior, denominando o conjunto como Complexo

Itapicuru. Todo o conjunto sedimentar do Grupo Jacobina passou por metamorfismo, alcançando a fácies xisto-verde, atingindo, em alguns locais, a fácies anfíbolito de grau metamórfico baixo.

Mougeout *et al.* (1996), por meio da datação em monazita utilizando os métodos U/Pb e Pb/Pb, identificaram duas idades distintas. Estabeleceram a idade de 3.4-3.3 Ga como a idade da área fonte e a idade de 2.086 Ga como a idade de sedimentação/metamorfismo. Ao longo das últimas décadas as divisões estratigráficas do Grupo Jacobina passaram por modificações.

4) Complexo Máfico-Ultramáfico de Campo Formoso: esse complexo foi inicialmente delineado por Couto *et al.* (1978) e consiste em uma extensa intrusão diferenciada, com aproximadamente 40 quilômetros de extensão e 1,2 quilômetro de espessura. É composto por uma combinação de serpentinitos, talco-clorita xistos, talco-tremolita xistos e anfíbolitos, originados de alterações hidrotermais resultantes da interação entre seus protólitos peridotíticos e piroxeníticos com os granitoides Paleoproterozóicos. Toda a sequência apresenta intensa deformação causada por falhas de empurrão, indicando, em linhas gerais, uma direção oeste de transporte tectônico. Isso a posiciona sobre o embasamento Arqueano e a fragmenta em fatias, tornando desafiadora a sua reconstituição estratigráfica e sua variação lateral.

Couto *et al.* (1978), com base em parâmetros fornecidos pelo padrão das camadas de cromitito estratiforme presentes neste complexo, sugeriu que as porções média e superior dessa sequência foram erodidas, estimando que sua espessura original fosse de 4 quilômetros. Por sua vez, Topitsch (1993) determinou sua idade através de comparações com intrusões máficas-ultramáficas de natureza semelhante em outros crátons, como o da Austrália Ocidental e Zimbábue, apontando para uma idade arqueana de aproximadamente 2.5-2.7 Ga.

5) Complexo Saúde: o Complexo Saúde encontra-se na porção setentrional do Bloco Gavião, situado na parte oriental da Serra da Jacobina. Estende-se por aproximadamente 130 km no sentido N-S, limitado a leste por rochas charnoenderbíticas de alto grau do *Bloco Jequié* e a oeste pelos TTGs do Complexo Mairi (CORDANI, 1973). E ao norte, faz fronteira com o Bloco Mairí, confrontando-se com o Complexo Itapicuru e o orógeno Curaça-Ipirá por meio de uma zona de transpressão (MELO *et al.*, 1995).

Composto predominantemente por metagrauvas, paragneisses aluminosos, kinzigitos, anfíbolitos, rochas calciossilicáticas e quartzitos subordinados, o Complexo Saúde apresenta uma paragênese marcada por estauroлита, cordierita e cianita. Nódulos específicos

compostos por quartzo, silimanita e muscovita são identificados em pontos particulares, definindo uma faixa metamórfica que varia de anfibolito alto a granulito (LEITE *et al.*, 2007). Em grande parte, encontra-se recoberto por sedimentos inconsolidados da Formação Capim Grosso, datados aproximadamente entre 2.6 e 2.7 Ga (OLIVEIRA *et al.*, 2002).

6) Granitoides Intrusivos: esses granitoides estão dispostos ao longo do Lineamento Contendas-Jacobina-Mirante, indicando a sutura resultante da colisão entre o Bloco Gavião e o Bloco Jequié (SABATÉ *et al.*, 1990). Sampaio *et al.* (2001) associam a emersão desses corpos ao término do ciclo transamazônico e ao desenvolvimento do cinturão móvel Itabuna-Salvador-Curaçá. Intrusivos nos ortognaisses do Complexo Mairí, esses granitoides apresentam foliações de tonalidade cinza-rosada, exibindo granulação equigranular de média a grossa. Na região da Serra da Jacobina diversos corpos graníticos são documentados na literatura, destacando-se, de norte a sul, os granitos do Flamengo, Jaguarari, Campo Formoso, Carnaíba, Mirangaba e Miguel Calmon. Essas formações afloram em superfície, variando de metros a centenas de quilômetros, e compartilham uma mineralogia característica composta por quartzo, plagioclásio, feldspato e micas (muscovita e biotita).

As idades de alguns desses granitos já foram determinadas, enquanto outros ainda aguardam investigação. Rudowski *et al.* (1987) descrevem a granitogênese da região como um granito a duas micas, mesocrático, com bordas contendo veios pegmatíticos. Trata-se de um granito cálcio-alcálico de alto potássio e peraluminoso. Barbosa *et al.* (2012) classificam os granitos como sin-colisional a pós-tectônico, conforme dados obtidos por Pearce *et al.* (1990), e corroborados pelo estudo de Sabaté *et al.* (1990), que, por meio do método Rb/Sr (Rocha Total), estabeleceram uma idade de 1.8 Ga.

7) Formações Recentes: as formações mais recentes incluem três tipos distintos de depósitos: coluvionares, aluvionares e detríticos (ROCHA, 1993). De acordo com Gomes (1993), os depósitos coluvionares estão localizados ao longo de escarpas, podendo se estender até áreas mais planas. São compostos por sedimentos que exibem uma gradação que varia entre materiais finos e grosseiros, incluindo seixos, matacões, argilitos, quartzitos e rochas do embasamento.

Os depósitos aluvionares estão intrinsecamente ligados às drenagens, constituindo-se principalmente de materiais areno-argilosos e cascalhos. Por sua vez, depósitos de relevo dendrítico estão associadas aos gnaisses e granitoides, caracterizando-se por sedimentos inconsolidados, predominantemente areno-argilosos, com a presença de níveis de cascalho.

2.1.2 Geologia Local – Garimpo Carnaíba e Garimpo Socotó

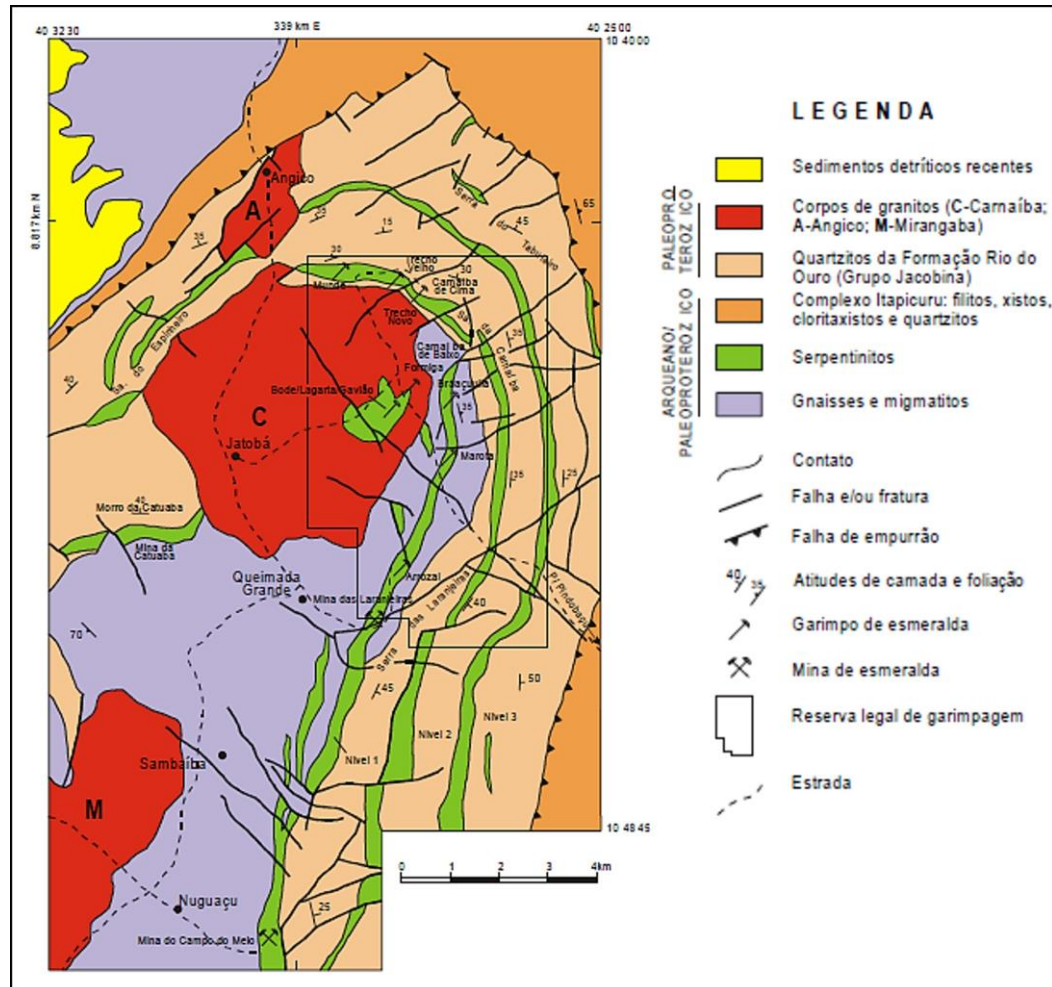
Após a exposição das características geológicas regional, esta seção destaca sucintamente as particularidades individuais de cada área de exploração da esmeralda abordada nesta pesquisa: o Garimpo de Carnaíba e o Garimpo de Socotó. O intuito é fazer sobressair as principais unidades litoestratigráficas encontradas nesses dois locais específicos. A Figura 5 apontou as áreas em questão que serão detalhadas nesta seção.

2.1.2.1 Garimpo de Carnaíba

Conforme destaca Moreira e Silva (2006), a área de Carnaíba apresenta características geológicas distintas marcadas pela presença de rochas Arqueanas a Paleoproterozóicas que compõem o Complexo Mairí, o Greenstone Belt de Mundo Novo, o Grupo Jacobina e Granitos Intrusivos. Essas rochas formam uma estrutura antiformal, sendo o núcleo ocupado pelo granito de Carnaíba e pelas rochas do Complexo Mairí.

Em Carnaíba as elevações da Serra da Jacobina são sustentadas por ortoquartzitos plaqueados, integrantes do Grupo Jacobina, predominantemente apresentando tonalidades verdes a brancas e recristalização. As rochas ultrabásicas, que hospedam esmeraldas e ocasionalmente alexandritas geralmente exibem serpentinização, seguindo a tendência dos quartzitos, estando dispostas em faixas com largura máxima de 200 metros; conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Representação cartográfica das características geológicas na área de Carnaíba.

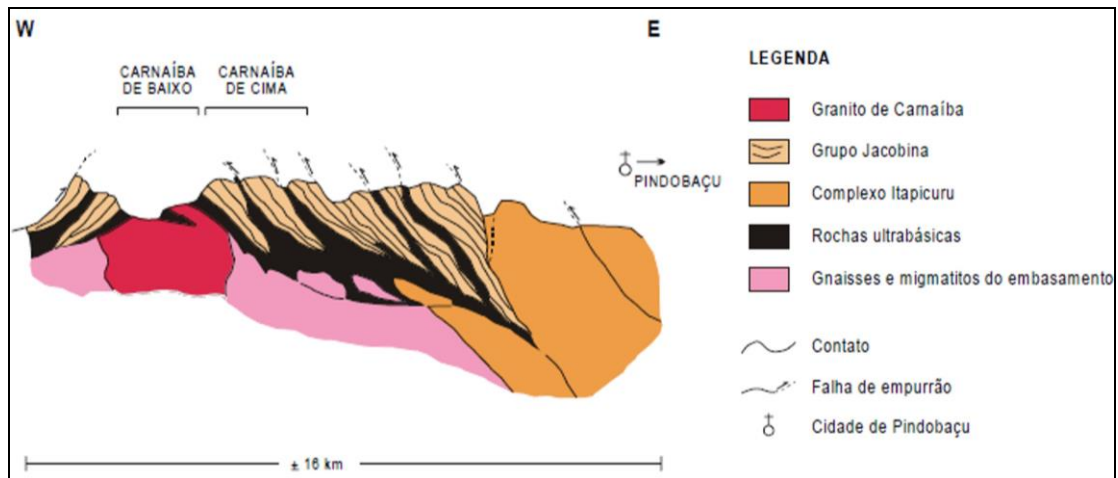


Fonte: Mapa Gemológico do Estado da Bahia, Couto (2000, p. 42).

As frentes de exploração, como Bráulia, Marota, Arrozal e a mina das Laranjeiras, encontram-se na borda da serra, entre o Granito de Carnaíba e os quartzitos, em uma área composta por rochas migmatíticas. Setores de exploração conhecidos como Trecho Velho e Trecho Novo estão situados em Carnaíba de Cima, enquanto os núcleos de exploração Bode, Gavião e Formiga estão localizados em enclaves de rochas ultrabásicas dentro do corpo granítico (COUTO, 2000).

Na seção geológica da Figura 7 pode-se observar a disposição dos quartzitos pertencentes ao Grupo Jacobina, alternados com rochas ultrabásicas, sendo moldados pela intrusão do Granito de Carnaíba. Já o Complexo Itapicuru foi classificado como uma sequência do tipo Greenstone Belt (Greenstone Belt Mundo Novo), conforme apontado por Mascarenhas e Silva (1994); abrangendo rochas ultrabásicas metamorfizadas que abrigam as esmeraldas de Carnaíba.

Figura 7 – Ilustração esquemática da seção geológica transversal na Região de Carnaíba.



Fonte: Mapa Gemológico do Estado da Bahia, Couto (2000, p. 44).

O Granito de Carnaíba apresenta uma composição mineralógica que varia desde leucotonalito até muscovita leucogranito, ocasionalmente inclinando-se para biotita granito (RUDOWSKY, 1989). As mineralizações de esmeralda em Carnaíba assemelham-se às do Complexo Gravelotte-Mica no cráton do Kaapvaal, desenvolvendo-se em zonas pegmatíticas intrusivas próximas a corpos plutônicos graníticos. A influência metassomática nas rochas ultrabásicas resultou na formação de esmeraldas e/ou alexandritas, como discutido por Anhaeusser (1976).

Os filões metassomáticos em Carnaíba, que abrigam berilo e/ou esmeralda, podem exibir núcleos de quartzo, frequentemente com aspecto boudinado, cercados por flogopita-biotita xistos, que transicionam gradualmente para serpentinitos mais preservados. Estruturalmente, dois tipos principais de filões foram identificados: um tipo associado a fraturas e outro a veios de contato entre a rocha serpentínica e os quartzitos, respectivamente (COUTO, 2000, p. 45 *apud* SANTANA *et al.*, 1995, p. 12).

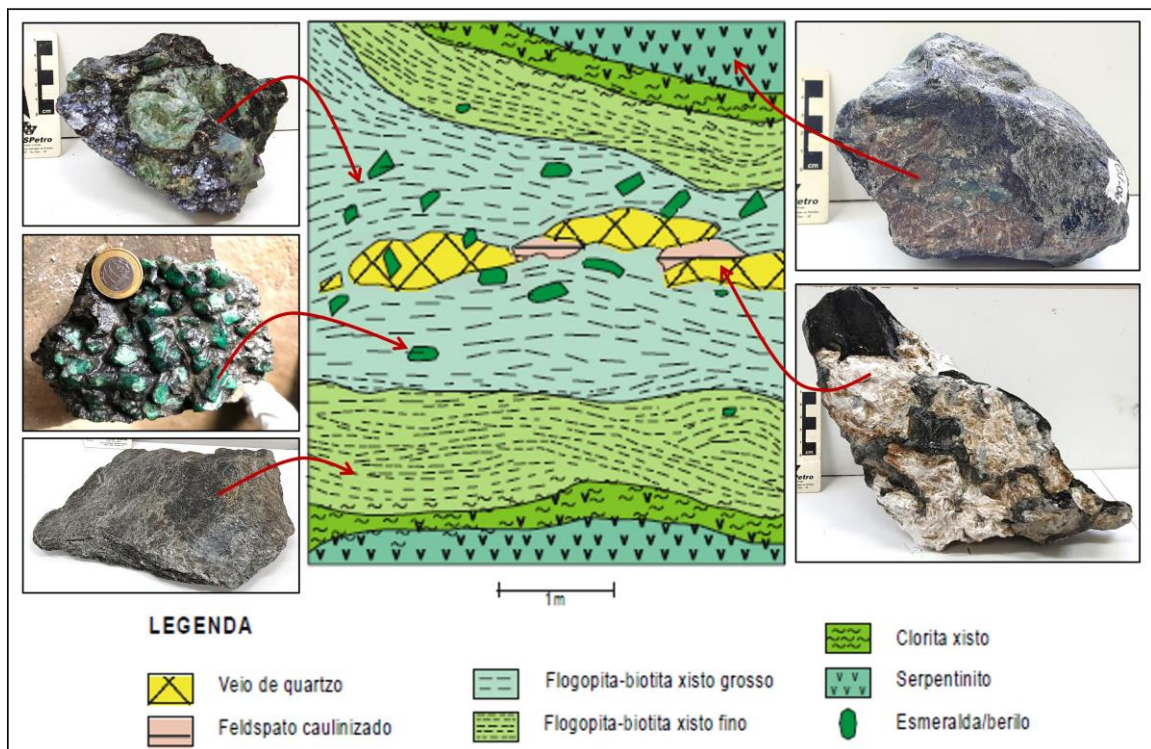
Segundo Rudowsky (1989) o granito de Carnaíba é "geoquímicamente" mais intrigante do que o granito de Campo Formoso, englobando a área de Socotó, devido ao seu conteúdo de nióbio, rubídio e berílio. O mesmo autor ressaltou também que, uma vez que o granito de Carnaíba não era enriquecido previamente em berílio no estado magmático, a quantidade e qualidade das esmeraldas formadas na rocha hospedeira estavam primordialmente ligadas à eficácia dos flogopititos como armadilhas metassomáticas ideais para as mineralizações. A geometria das zonas ricas em flogopita xistos é condicionada por

fraturas, xistosidade e contato litológico. Além disso, um aporte essencial de potássio, sílica e alumina é necessário para a formação dos flogopititos metassomáticos.

Já Giuliani e Couto (1980) enfatizaram que o berilo verde e a esmeralda de Carnaíba parecem estar associados a pegmatóides albíticos, em vez de um típico pegmatito-granito *stricto sensu*. Esses autores destacaram a importância do processo de infiltração metassomática na formação das esmeraldas na região, decorrente de uma significativa anomalia geotermal originada pelo granito.

Os serpentinitos, transformados por processos metassomáticos, em conjunto com as intrusões, geraram zonas com uma distribuição que vai do núcleo para a periferia: quartzo, flogopita-biotita xisto (fino e grosso), clorita xisto e serpentinito encaixante. A talcificação variável localmente transformou o xisto grosso em flogopita-biotita-talco xisto. Os cristais de esmeralda são mais prevalentes no xisto grosso e, em menor frequência, no núcleo quartzoso e no xisto fino. A Figura 8 ilustra de maneira esquemática a ocorrência do berilo verde/esmeralda em um filão do tipo veio-camada ou esteira, com um modelo completo de zoneamento (COUTO, 2000).

Figura 8 – Representação esquemática da distribuição completa em um filão mineralizado, desde o núcleo quartzoso até o serpentinito encaixante.



Fonte: Adaptado de Couto (2000, p. 49).

Couto (2000) ainda relata que a esmeralda descoberta nos garimpos de Carnaíba exibe uma marcante coloração verde, característica da substituição do íon alumínio pelo cromo no berilo. Entretanto, sua tonalidade varia conforme a intensidade dessa troca. A classificação das esmeraldas brutas, influenciada pela propriedade mencionada, juntamente com o grau de cristalização e outras características ópticas, ocorre principalmente nos garimpos locais e no mercado de Campo Formoso.

A presença de molibdenita e scheelita, encontradas nos micaxistos em associação com o berilo, indica uma relevante influência pneumatolítica/metassomática na região de Carnaíba, dado que o molibdênio e o tungstênio não são elementos essenciais dos pegmatitos. Durante a década de 80, quantidades anuais entre 10 e 30 toneladas de molibdenita e cerca de 150 quilogramas de scheelita foram extraídas, especialmente em áreas de garimpagem localizadas em Carnaíba de Baixo (COUTO, 2000, p. 46 *apud* SANTANA; MOREIRA, 1980, p. 32).

2.1.2.2 Garimpo de Socotó

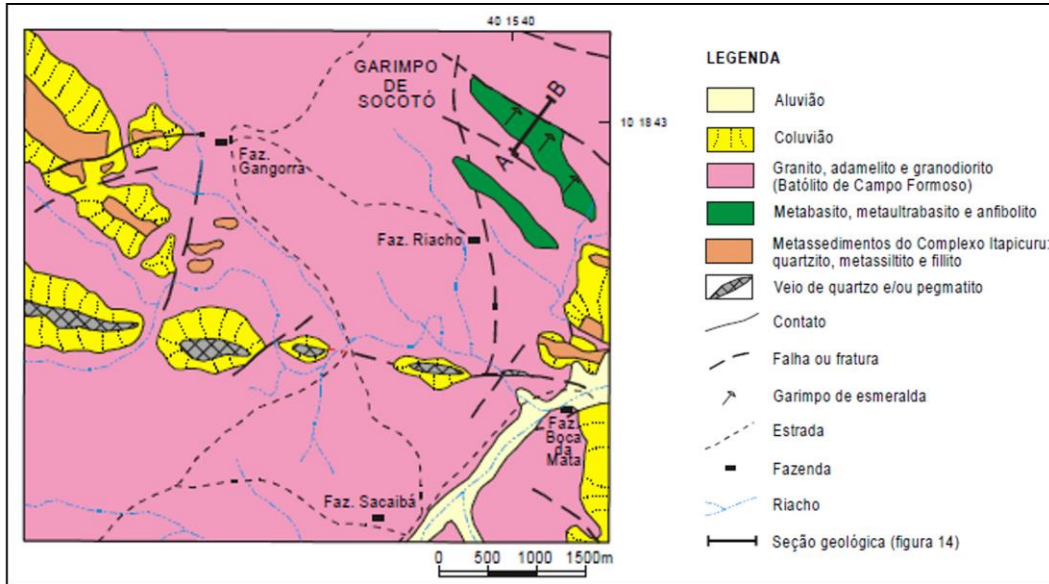
A área de Socotó é constituída por formações rochosas que abrangem períodos Arqueanos e Paleoproterozóico. Essas formações incluem o Complexo Mairí, o Complexo Máfico-Ultramáfico de Campo Formoso, o Grupo Jacobina e o Granito de Campo Formoso.

Couto *et al.* (1978) relatam que no início de 1983, a cerca de 40 quilômetros a nordeste da região de Carnaíba, foram identificados berilos verdes em afloramentos rochosos na Fazenda Piabas. Essas rochas se assemelhavam aos xistos que hospedam as esmeraldas. A partir das primeiras escavações surgiu o garimpo de Socotó, no município de Campo Formoso. Antes da descoberta fortuita das esmeraldas já havia sinais dessa mineralização nos serpentinitos que aparecem como enclaves no batólito granítico de Campo Formoso.

No Garimpo de Socotó ocorre um confinamento das rochas ultrabásicas que abriga mineralizações de esmeralda, sendo constituído por uma variedade que inclui serpentinitos, talcitos, anfíbolitos, biotita xistos, gabros e diabásios. Na zona de contato os tipos félsicos são representados por muscovita-quartzo xisto e granodiorito. Em veios extremamente finos de flogopitito, nota-se o desenvolvimento da flogopita em fraturas pré-existentes no serpentinito. Os flogopititos exibem uma notável deformação, caracterizada por dobras apertadas, boudinage e crenulações. Esse corpo ultrabásico apresenta uma forma alongada, medindo aproximadamente 2 km de comprimento por 100 metros de largura média,

com uma orientação geral em torno de $N30^{\circ}W/50^{\circ}-80^{\circ}SW$ (COUTO, 2000). A Figura 9 evidencia o corpo rochoso ultrabásico de Socotó dentro do cenário geológico regional.

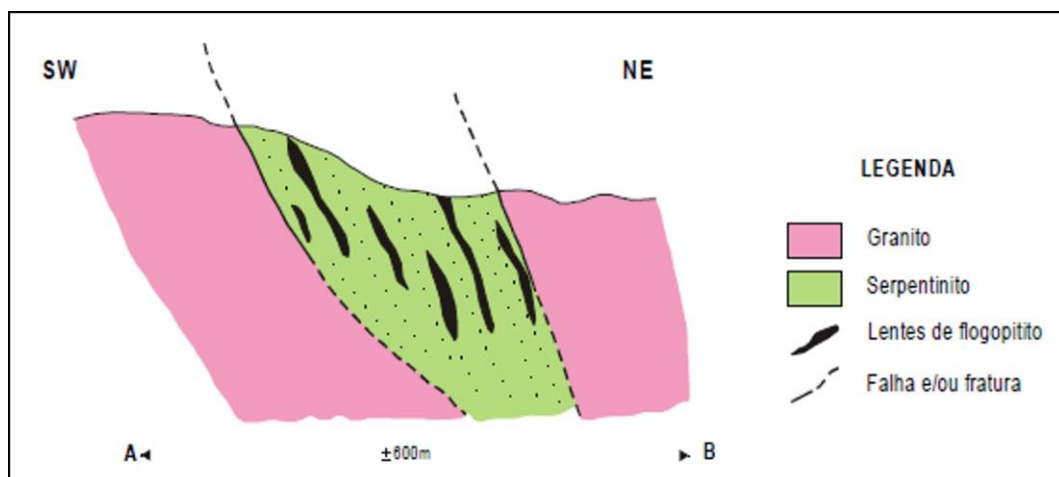
Figura 9 – Mapa geológico do Garimpo de Socotó.



Fonte: Mapa Gemológico do Estado da Bahia, Couto (2000, p. 50).

Segundo Rudowsky (1989), o corpo rochoso ultrabásico é interpretado como uma escama de serpentinito no granito, possivelmente milonitizados na zona de contato, conforme mostra a Figura 10.

Figura 10 – Ilustração esquemática da seção geológica A-B no garimpo Socotó.



Fonte: Mapa Gemológico do Estado da Bahia, Couto (2000, p. 56).

Santana *et al.* (1995) evidenciaram que o serpentinito é, na verdade, um xenólito dentro do corpo granítico. Esse serpentinito foi intensamente fraturado, associando-se aos pegmatitos que abrigam o berilo e as esmeraldas.

Nesta região as rochas do Complexo Itapicuru exibem uma deformação arqueada com uma curvatura voltada para leste, envolvendo o granito de Campo Formoso. De acordo com Couto *et al.* (1991), o batólito intrusivo é um conjunto de rochas félsicas ricas em potássio-sódio, predominantemente graníticas, com variações que incluem adamelitos e granodioritos. Na porção norte da intrusão há uma concentração significativa de xenólitos apresentando composição diversificada, como quartzito, migmatito, anfibolito, metabasito e metaultrabasito. Pegmatitos quartzo-feldspáticos e veios de quartzo estão amplamente distribuídos nessa área.

Couto *et al.* (*op. cit.*), ao descreverem Socotó, estabelecem comparações e identificam analogias geológicas entre esse garimpo e o enclave do Bode, situado em Carnaíba de Baixo. Em ambas as localidades a extração subterrânea ocorre por meio de poços que alcançam profundidades superiores a 100 metros, com uma média em torno de sessenta metros. Posteriormente as galerias foram abertas, com algumas ultrapassando os 300 metros de extensão.

2.2 Aspectos da Extração de Esmeraldas na Serra da Jacobina

As mencionadas ocorrências de esmeralda na porção setentrional da Serra de Jacobina foram inicialmente identificadas em 1963 (SANTANA; MOREIRA, 1980), desencadeando um significativo aumento populacional na região. Durante o auge da exploração, ao término da década de 1970, a área chegou a acolher aproximadamente 15 mil habitantes, distribuídos nas proximidades, formando distintos núcleos de produção da gema. Estes núcleos, conhecidos como Carnaíba de Cima, Bode-Lagarto-Gavião, Arrozal, Bráulia e Marota, foram consolidados em 1978 pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (hoje representado pela Agência Nacional de Mineração - ANM) como uma área legal de garimpo, abrangendo 3.692 hectares (MOREIRA; SILVA, 2006).

Neste período, a produção anual de esmeraldas na região atingia aproximadamente 31.000 quilogramas, equivalendo a 25% do valor total das exportações brasileiras de pedras preciosas brutas e lapidadas; excluindo-se o diamante. Esse setor movimentava anualmente a cifra de 5 milhões de dólares, conferindo à Bahia o prestigioso

título de principal produtor nacional de esmeraldas (MOREIRA; SILVA, *op. cit.*). Durante a década de 1980, a descoberta de novas ocorrências em Socotó, no município de Campo Formoso, provocou uma migração da região de Carnaíba, resultando, por conseguinte, em uma acentuada queda na produção desta localidade.

No entanto, somente em 1983 foi estabelecido o primeiro garimpo em Socotó, quase duas décadas após a identificação inicial da ocorrência de esmeralda na região. No período compreendido entre 1983 e 1987, quase dois terços dos 56.860 quilogramas de esmeralda produzidos no estado da Bahia foram provenientes do garimpo de Socotó (SANTANA *et al.*, 1995).

Ainda durante a década de 1980, a descoberta de novas ocorrências, desta vez nos estados de Goiás e Minas Gerais, marcou o declínio da produção de esmeraldas na região de Carnaíba. Entretanto, a partir de 1991 observou-se um ressurgimento das atividades com um número reduzido de frentes de serviços e um aporte financeiro e técnico mais substancial. Esse cenário resultou em uma otimização da produção e na ampliação das cavas que, anteriormente, limitavam-se a 60 metros de profundidade; atingindo agora até 240 metros (CBPM, 2019).

É inegável a significativa importância e riqueza desta renomada província metalogenética, amplamente reconhecida internacionalmente. Os estudos geológicos realizados até o momento revelam a promissora extensão dessa área, ainda em grande parte por explorar. Ao longo da Serra da Jacobina, deparamo-nos com as minas ou os "cortes", como são conhecidos de forma popular entre os garimpeiros. Após a descoberta das esmeraldas, surgiram os serviços de garimpagem de maneira desordenada.

Quanto à legislação nacional, o Regulamento do Código de Mineração, Lei nº 227/1967, em seu artigo 70, define que,

I - garimpagem, o trabalho individual de quem utilize instrumentos rudimentares, aparelhos manuais ou máquinas simples e portáteis, na extração de pedras preciosas, semi-preciosas e minerais metálicos ou não metálicos, valiosos, em depósitos de eluvião ou aluvião, nos álveos de cursos d'água ou nas margens reservadas, bem como nos depósitos secundários ou chapadas, vertentes e altos de morros; depósitos esses genericamente denominados garimpos. (BRASIL, 1967).

As mineralizações de esmeraldas na Bahia seguem padrões de veios que acompanham contatos, falhas e/ou fraturas com direção e mergulhos bem definidos. Essa

característica facilita consideravelmente os controles de lavra, conforme destacado por Moreira e Silva (2006).

Fundamentado nas informações e descrições apresentadas por Cavalcante (2010), Dantas (2022) e nas observações provenientes das visitas técnicas às áreas de garimpo em Carnaíba e Socotó, evidencia-se que o processo de extração das esmeraldas é conduzido por meio de galerias subterrâneas, escavadas de maneira vertical (poço) sob estruturas abrigadas no solo rochoso. Essas galerias são utilizadas para acesso às áreas de interesse mineral, como mostra a Figura 11 (A), (B), (C) e (D).

Figura 11 – Galeria de Extração de Esmeralda. (A) abertura do "poço" na mina São Francisco; (B) entrada da mina (com diâmetro de 60 a 80 cm); (C) interior da mina a 240m de profundidade; (D) sistema de descida/subida e comunicação entre os garimpeiros, realizado por meio da alternância de dois trabalhadores; (E) sistema de iluminação e escavação no interior da mina; (F) método de extração de esmeralda (utilizando picaretas, martelos e marretas); (G) material desagregado após o uso de explosivos; e (H) veio mineralizado.



Fonte: Autora.

Durante as operações, os *blasters*, especializados na manipulação de explosivos, empregam bananas de dinamite, fixando-as em fendas na rocha. Ao identificar os veios de esmeralda, a extração é realizada por meio de ferramentas como martelos, marretas e picaretas. Importante ressaltar que as minas contam com sistemas especializados de

iluminação e comunicação para garantir “possíveis” condições seguras e eficientes durante as atividades de exploração; essas evidenciadas na Figura 11 (E), (F), (G) e (H).

Dantas (2022) descreve que os garimpeiros envolvidos nas operações subterrâneas seguem uma organização por turnos, trabalhando ininterruptamente por oito horas, divididos em dois períodos (07:00h às 15:00h e das 15:00h às 23:00h), retornando à superfície apenas no encerramento de cada turno.

Ao observar o processo de extração de esmeraldas nos garimpos torna-se claro que os resíduos resultantes das escavações, também referidos como "sobras das escavações", apontado na Figura 12, ainda contêm mineralizações, embora em baixa concentração e distribuição irregular na massa rochosa. Mesmo assim, esses resíduos conservam importância comercial, especialmente sob a perspectiva das comunidades locais.

Figura 12 – Em (A) resíduo que sobra das escavações (ensacados), chamados localmente de “arroio”; em (B), (D) e (E) quijileiros realizando a lavagem do resíduo da esmeralda, e; (C) e (F) resíduo com teor baixo de minério.



Fonte: Dantas (2020, p. 32 e 33) e Site vivaosertao.com.br (2024).

Os resíduos das "sobras das escavações", conhecidos localmente como "arroio", como se observa na Figura 12 (A), (B) e (C) são repassados pelos proprietários da mina aos "quijilas" ou “quijileiros”, evidenciado na Figura 12 (D), um termo popular utilizado para

referir-se às senhoras, anciãos e homens desempregados que permanecem nas proximidades das minas.

Estes trabalhadores dedicam-se à lavagem dos resíduos em recipientes, como mostra a Figura 12 (E), com o objetivo de detectar a presença de esmeraldas, conforme observado na Figura 12 (F). Os achados são comercializados ou trocados por produtos alimentícios. Essa atividade envolve aproximadamente 2.500 pessoas na região circunvizinha à área de garimpo (DANTAS, 2022; CAVALCANTE, 2010).

Em seu estudo sobre as práticas diárias no garimpo da Serra da Carnaíba, Cavalcante (2010) revelou que, durante um único ano de exploração de esmeraldas sem a devida orientação técnica, foram produzidos mais de 2.400 m³ de material de lavra, contribuindo significativamente para o aumento do passivo ambiental, com perspectivas limitadas para atividades mineradoras sustentáveis; conforme revela a Figura 13.

Figura 13 - Resíduos provenientes da extração de esmeraldas descartados de maneira inadequada na região de Carnaíba, em Pindobaçu-BA. Na imagem (A), uma visão panorâmica da exploração em 2010, e na imagem (B), uma visão geral da exploração em 2013.



Fonte: (A) Site gemasdobrasil.blogspot.com e (B) Site carnaibadasesmeraldas.blogspot.com.

De acordo com análises conduzidas pela Companhia Baiana de Pesquisa Mineral (CBPM, 2019), a atividade de exploração de esmeraldas encontra-se em uma fase de crescimento notável, representando menos de 10% do potencial total do subsolo. Essa conclusão é respaldada por dados provenientes de furos de sondagem, os quais evidenciam a presença de esmeraldas a profundidades de até 500 metros.

2.3 Incorporação Sustentável para os Resíduos Minerais

A incorporação sustentável dos resíduos minerais emerge como um tema de considerável importância no âmbito contemporâneo da gestão ambiental e da indústria extrativa. A crescente demanda por minerais em diversas aplicações industriais e tecnológicas tem concomitantemente acarretado um aumento correspondente na geração de resíduos derivados das atividades de mineração. A preocupação com as problemáticas ambientais, como delineado por Ribeiro Neto (2023), tem sido objeto de discussões ao longo do tempo e essa linha de argumentação está intimamente atrelada à temática da incorporação sustentável dos resíduos minerais.

Com o passar dos anos, uma sucessão de reflexões tem sido desencadeada em resposta a acidentes ambientais significativos, impulsionando a necessidade de reavaliar os paradigmas previamente estabelecidos; conforme discutido por Philippi *et al.* (2014). Esses eventos desafiadores, combinados com os efeitos dos fenômenos climáticos adversos, têm desempenhado um papel decisivo na evolução do conceito de desenvolvimento sustentável. Elkington (2011), um destacado cientista nesta área, introduziu o conceito de "triple bottom line", enfatizando a necessidade de considerar não apenas os aspectos ambientais, mas também os sociais e econômicos na busca pela sustentabilidade.

Esta abordagem multidimensional foi posteriormente adotada pela Organização das Nações Unidas (ONU), conforme delineado no relatório "Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável" (UNITED NATIONS, 2015), como evidenciado na Figura 14; estabelecendo metas e objetivos abrangentes para orientar as ações globais em prol da sustentabilidade.

Figura 14 - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030.



Fonte: United Nations (2015).

Nas regiões dos garimpos de Carnaíba e Socotó, a extração de esmeraldas é conduzida por mais de 200 frentes de lavra. Estas operações frequentemente são abandonadas devido ao controle precário exercido pelos mineradores sobre a geometria e os condicionantes das jazidas, sendo posteriormente reativadas durante os períodos de maior intensidade na atividade mineradora. Essa prática resulta na geração de resíduos volumosos da ordem de centenas de milhares de metros cúbicos, os quais são dispostos em encostas, ocasionando o assoreamento de vales e a formação de extensas pilhas, parte das quais localizando-se dentro das áreas urbanas das pequenas comunidades garimpeiras.

Diante da necessidade da Cooperativa Mineral da Bahia (CMB) em atender às exigências para qualificação da atividade como uma Associação Produtiva Local (APL Mineração), a gestão eficiente da disposição de resíduos emerge como um imperativo. Nesse contexto, a possibilidade de aproveitamento de uma fração substancial dos materiais resultantes da lavra se configura como uma perspectiva promissora, despertando o interesse da cooperativa.

A valorização dos resíduos provenientes das operações de garimpagem representa um dos desafios preeminentes nas localidades supracitadas. O descarte indiscriminado desses resíduos na natureza acarreta significativos impactos ambientais, ressaltando a importância de estratégias sustentáveis para mitigação desses efeitos adversos.

Ao considerar o material descartado como uma forma de utilização alternativa, em consonância com os princípios do desenvolvimento sustentável e voltada para sua reutilização, visando não apenas mitigar a quantidade de resíduos lançados na biosfera, mas também criar novas oportunidades de emprego (MOTHE FILHO *et al.*, 2005).

Sendo assim, é possível constatar que a aplicação de técnicas de reutilização dos resíduos minerais provenientes dos garimpos está em consonância com cinco dos dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) descritos pela Organização das Nações Unidas (ONU) na Agenda 2030. Estes objetivos, abrangendo uma variedade de esferas, englobam o estímulo ao avanço da indústria, inovação e infraestrutura, a promoção de comunidades e áreas urbanas sustentáveis, o incentivo ao consumo e produção responsáveis, a preservação da biodiversidade terrestre e o fortalecimento de parcerias e mecanismos de implementação.

No que concerne ao progresso sustentável, dada a sua relevância para o setor da mineração, é reconhecido que seus princípios são essenciais para a construção de uma sociedade equitativa. Nessa perspectiva, Silva (2007) argumenta que:

A mineração é um dos setores básicos da economia do país, contribuindo de forma decisiva para o bem-estar e a melhoria da qualidade de vida das presentes e futuras gerações, sendo fundamental para o desenvolvimento de uma sociedade equânime desde que seja operada com responsabilidade social, estando sempre presentes os preceitos do desenvolvimento sustentável. (SILVA, 2007, p. 1).

No entendimento de Menezes *et al.* (2002), a reciclagem compreende o conjunto de técnicas cujo propósito é aproveitar detritos e resíduos, reintegrando-os ao ciclo de produção. A prática da reciclagem de resíduos, independentemente de sua tipologia, apresenta diversas vantagens em comparação com a utilização de recursos naturais "virgens". Entre estas destacam-se a redução do volume de extração de matérias-primas, a diminuição do consumo de energia, a mitigação das emissões de poluentes e a promoção da saúde e segurança da população. A vantagem mais evidente da reciclagem reside na preservação dos recursos naturais, prolongando sua vida útil e minimizando a degradação da paisagem, fauna e flora.

Considerando as implicações ambientais, econômicas e sociais, a prática crescente da reciclagem de resíduos sólidos no Brasil é notória, como destacado por Conceição (2009). Em consonância com esse contexto, o Compromisso Empresarial pela Reciclagem (CEMPRE, 2014) relata que o Brasil, em comparação com diversas nações, evidencia índices substanciais de reciclagem, sugerindo um potencial significativo para a ampliação e aprimoramento dessa atividade no país. Essa perspectiva converge com a compreensão anterior sobre a importância da reciclagem na preservação de recursos naturais, na redução de impactos ambientais e na promoção de práticas mais sustentáveis na sociedade, e assim, atendendo os objetivos propostos na agenda 2030.

Conforme ressaltado pelo Ministério do Meio Ambiente (2014), para além dos benefícios ambientais, a reciclagem de materiais constitui-se como uma perspectiva de negócios, gerando oportunidades de emprego e renda. Ademais, essa prática subsidia estratégias de conscientização da população em relação às questões ambientais, promovendo simultaneamente o uso eficiente dos recursos.

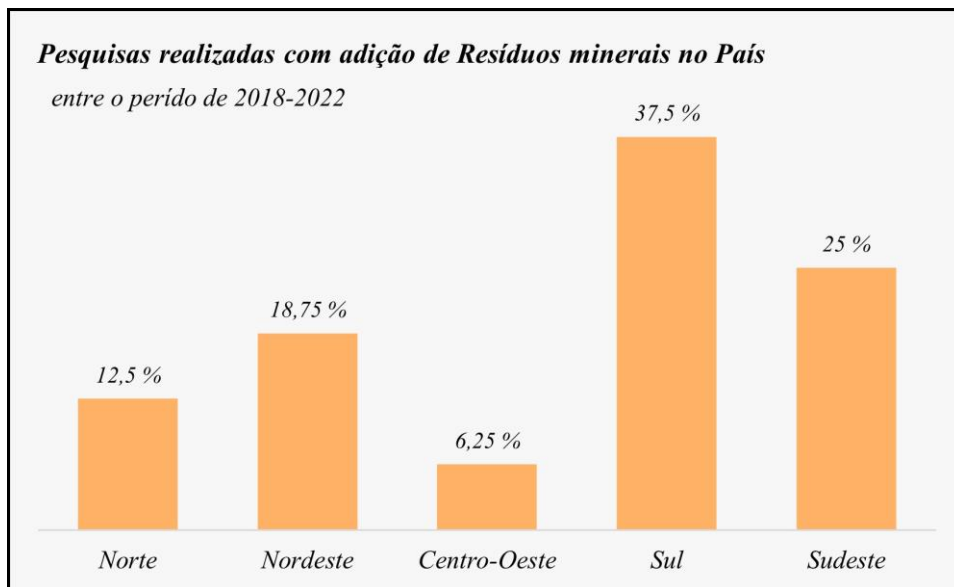
Com o propósito de realçar os múltiplos benefícios decorrentes da reciclagem, pesquisadores têm alcançado resultados promissores ao explorar a utilização de resíduos minerais como alternativa para a disposição final de um produto.

Ribeiro Neto (2023) em sua investigação estabelece conexões entre várias pesquisas que exploram a viabilidade da utilização de resíduos minerais como uma alternativa

material. Ele destaca que esses estudos estão alinhados com os princípios da sustentabilidade, propondo a incorporação de minerais através da utilização de resíduos gerados por diversas indústrias.

Os estudos apresentados por Ribeiro Neto (*op. cit.*) indicam que as pesquisas sobre a utilização de resíduos minerais no período de 2018 a 2022 se concentram em maior parte nas instituições localizadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, conforme evidenciado na Figura 15. Isso indica que existe uma demanda e um interesse consideráveis por esse tipo de investigação nessas áreas. Entretanto, a representação de pesquisas sobre adição mineral em outras regiões do país é atualmente limitada, o que sublinha a necessidade de desenvolver estudos sobre essa temática em tais localidades.

Figura 15 – Percentual de pesquisas realizadas com a adição de resíduos minerais nas Pós-Graduações brasileiras no período de 2018 a 2022, segundo Ribeiro Neto (2023).



Fonte: Modificado de Ribeiro Neto (2023).

Partindo desse pressuposto, no Quadro 1 são apresentados outros exemplos de estudos, como o de Ribeiro Neto (2023), que contribuem para o avanço das pesquisas voltadas à promoção de práticas mais sustentáveis na sociedade.

Quadro 1 – Uma visão sobre o desenvolvimento de pesquisas no Brasil relacionadas ao uso de resíduos minerais nas últimas duas décadas.

Instituição	Ano	Autor/a	Título	Conclusão
IFRS	2024	Letícia Maria Mossmann	Avaliação da resistência mecânica em argamassas com adição de finos de tijolos e carvão vegetal	Verificou-se que a formulação com 20 % de finos de tijolo e 5 % de carvão vegetal apresentaram resistência mecânica à compressão maiores que a argamassa sem adição de resíduos, a partir de 28 dias de maturidade.
IFES	2024	Marcelo Santos Neves	Potencial do uso combinado de lodo de estação de tratamento de água e resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais na produção de massa cerâmica argilosa	Conclui-se que é possível aproveitar simultaneamente ambos os resíduos como matéria-prima alternativa na produção de material cerâmico contribuindo para a sustentabilidade dos setores envolvidos.
UFOP	2024	Luis Gustavo de Souza Rezende	Aplicação de rejeito de minério de lítio como fundente na produção cerâmica branca	Notou-se que os testes realizados indicaram que as proporções do rejeito têm relação inversa com à absorção de água, e relação direta com a massa específica aparente e resistência à compressão uniaxial.
IFRN	2023	Djalma Valério Ribeiro Neto	Efeito da utilização de resíduos sólidos de rochas ornamentais do Seridó Potiguar nas propriedades de argamassa autonivelante	Obteve-se na pesquisa uma argamassa autonivelante com adição de RPRO com potencial de aplicação na indústria de construção civil, com destaque para a adição de 10% que teve os melhores resultados.
UFRN	2022	Cleanto Carlos de Queiroz Junior	Estudo da influência da substituição parcial da areia pelo resíduo do corte de pedras ornamentais nas propriedades de argamassas para impressão 3d	Conclui-se que a substituição parcial da areia natural pelo RPPO conferiu uma maior resistência mecânica à argamassa, mas também causa um aumento da absorção e do índice de vazios, porém, não ocorreu diminuição da resistência mecânica.
UFERSA	2018	Leonardo de Medeiros Silva	Caracterização de resíduos minerais visando aplicação como agregado para materiais de matriz cimentícia	Constatou-se que as propriedades físicas dos agregados estudados são semelhantes e adequadas para uso em argamassas, mas a caracterização química indica a necessidade de avaliar a reatividade em meios agressivos.
UENF	2017	Fabrcio Bagli Siqueira	Desenvolvimento de revestimento cerâmico poroso utilizando resíduo grits	Os dados experimentais (absorção de água, retração linear e tensão de ruptura a flexão) indicaram que é possível a substituição total de calcário calcítico por resíduo grits na formulação de revestimento poroso para temperatura de queima a partir de 1100 °C.

Instituição	Ano	Autor/a	Título	Conclusão
CPRM	2016	Magda Bergmann	Caracterização de flogopititos e outras rochas encaixantes das mineralizações de esmeralda de Campo Formoso e Pindobaçu (Ba) como fontes de potássio e multinutrientes para remineralização de solos	Os flogopititos constituídos por até 98% de flogopita (K_2O -10,86 %; MgO -21,9%), são considerados fontes de multinutrientes, com potencial de disponibilização de K, Mg, Fe e Si, e dos micronutrientes Mn, Mo e V.
UFRN	2013	João Alfredo de Almeida Barros	Estudo do aproveitamento do rejeito da mineração de esmeraldas na produção de refratários conformados isolantes	A mistura com 45% de rejeito, 45% de alumina e 10% de caulim apresenta uma refratariedade de 1420°C, variação linear dimensional a 2,00%, densidade aparente de 1,56g/cm ³ e porosidade de 46,68%. Isso mostra que o rejeito possui um potencial como matéria-prima para aplicação na indústria.
UFRN	2012	Tércio Graciano Machado	Estudo da adição de resíduo de scheelita em matriz cerâmica: formulação, propriedades físicas e microestrutura	Os resultados obtidos apontam para a possibilidade de incorporação de até 20% de resíduo de scheelita em massas cerâmicas convencionais empregadas nas indústrias de cerâmica para a produção de itens como cerâmica vermelha, tijolos, blocos e telhas cerâmicas.
UFRN	2010	Ronaldo Fonseca Cavalcante	Estudo do potencial de utilização do resíduo da extração de esmeraldas na fabricação de cerâmica de revestimento	O resíduo de esmeralda composto basicamente de 73% de ($SiO_2+Al_2O_3$) e 17,77% de ($MgO+Na_2O+K_2O$) pode ser adicionado na massa cerâmica de revestimento sem comprometimento das propriedades do produto sinterizado.
UFRN	2008	Maria Luiza Lopes de Oliveira Santos	Aproveitamento de resíduo mineral na formulação de argamassa para a construção civil	É possível substituir o cimento por até 30% de resíduo de calcário na formulação de argamassas. Destaca ainda que não é necessário realizar beneficiamento nos resíduos antes de sua aplicação nas argamassas. Isso contribui para a redução dos custos associados à produção do produto.
IPEN	2006	Roberta Monteiro de Mello	Utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de mármore e granito como matéria-prima em cerâmica vermelha	Os resultados demonstraram a viabilidade de aproveitamento destas lamas, apontando vantagens de sua utilização, porém levando em consideração algumas condições adotadas.

Fonte: Elaborado pela autora.

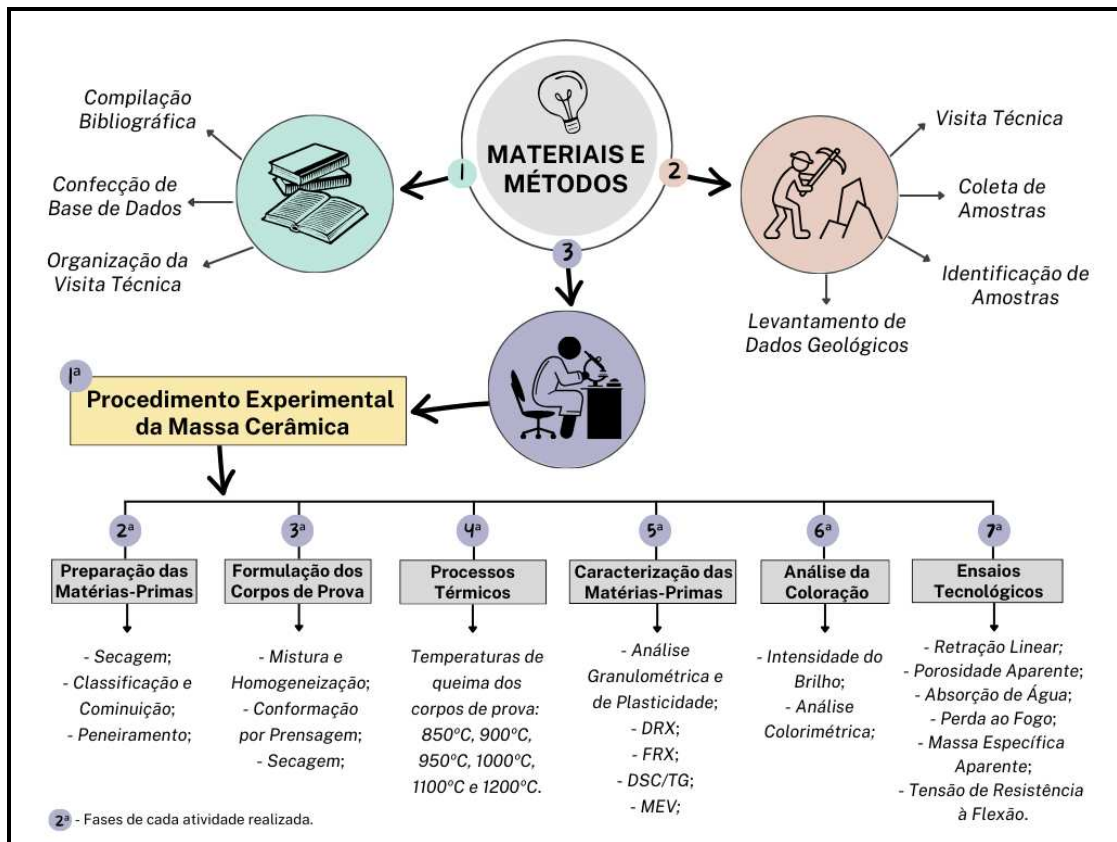
Diante da premissa exposta, o presente estudo propõe não apenas oferecer uma abordagem inovadora para a gestão dos resíduos resultantes da exploração de esmeraldas, mas também apresentar soluções concretas que conciliem interesses econômicos com

responsabilidade ambiental; esses alinhados com os objetivos propostos pela agenda 2030. Destaca-se a urgência dessa investigação, com especial ênfase nos impactos desses resíduos nas propriedades tecnológicas, microestrutura, durabilidade e na caracterização químico-ambiental do produto. Assim, a integração desses resíduos em processos produtivos sustentáveis representa um avanço significativo em direção a uma abordagem mais equilibrada e eficiente no setor de mineração.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Atingir êxito no que tange aos objetivos primordiais desta pesquisa demandou a implementação de uma série de procedimentos convencionais no âmbito geológico, os quais foram meticulosamente delineados em conformidade com o fluxograma apresentado na Figura 16, correspondendo a cada fase do estudo.

Figura 16 – Fluxograma de organização do trabalho para execução da pesquisa.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 Levantamento Bibliográfico

A elaboração deste estudo iniciou-se com uma revisão bibliográfica abrangente, contemplando trabalhos conduzidos na região de interesse, incluindo monografias, dissertações, relatórios técnicos, artigos publicados, entre outros. Este levantamento abordou a geologia da área em estudo e informações pertinentes às questões ambientais relacionadas aos resíduos minerais provenientes da exploração de esmeraldas. Adicionalmente foram

confeccionados mapas-base mediante a utilização de softwares de geoprocessamento, cartas topográficas, imagens de satélite e shapex de litologias disponibilizados no Geobank da CPRM, visando a aplicação prática durante as atividades de campo.

3.2 Atividade de Campo

Nesta fase da pesquisa foram conduzidas três etapas de atividades de campo, cada uma com duração variando entre seis e dez dias. Essas atividades visaram realizar um levantamento de dados geológicos utilizando como base o mapeamento geológico preexistente e complementando-o com a inclusão de perfis litológicos provenientes de trabalhos conduzidos pela CPRM (2022) e CBPM (2019).

Na continuidade desta atividade foram selecionados e coletados dois tipos de resíduos minerais oriundos da exploração de esmeraldas, obtidos no garimpo de Carnaíba, no município de Pindobaçu, Bahia, e no garimpo de Socotó, localizado no município de Campo Formoso, Bahia; além de uma argila proveniente de uma jazida localizada no Distrito de Umbuzeiro, Bahia. Os locais de coleta desses materiais são evidenciados na Figura 17. Posteriormente, as matérias-primas coletadas foram devidamente armazenadas individualmente em sacos plásticos e codificadas.

Figura 17 – Em (A) coleta da argila no Distrito de Umbuzeiro-BA, e, em detalhe, a argila *in situ*; (B) coleta do resíduo de exploração da esmeralda no garimpo de Socotó em Campo Formoso, e (C) Forma de armazenamento das amostras.



Fonte: Autora.

3.3 Trabalhos Experimentais

Durante a fase experimental foram desenvolvidos diversos procedimentos fundamentados com base em análises geológicas. Estes procedimentos incluíram descrições macroscópicas detalhadas das rochas coletadas em campo, processamento de resíduos minerais e caracterização tecnológica dos materiais. O processo iniciou-se com a preparação das amostras de matérias-primas coletadas durante as atividades de campo, que posteriormente foram submetidas a análises laboratoriais e ensaios tecnológicos específicos. A seguir serão descritas as etapas de cada atividade realizada, conforme detalhado no fluxograma de execução da pesquisa apresentado na Figura 16.

3.3.1 Procedimento Experimental da Massa Cerâmica

Neste estudo foi implementado um plano experimental utilizando réplicas que consiste na aplicação de uma mesma condição pré-estabelecida em diferentes unidades experimentais. A aplicação desta técnica permite estimar como o erro experimental afeta os resultados dos ensaios e se esses resultados são estatisticamente significativos (MONTGOMERY, 1991).

Destaca-se que a utilização de resíduos minerais na formulação de massas cerâmicas para a produção de materiais cerâmicos constitui o tema central desta tese. Alguns parâmetros que afetam a qualidade desses materiais foram mantidos constantes no planejamento dos experimentos, incluindo a granulometria das matérias-primas, o limite de liquidez, o limite de plasticidade, a atmosfera do forno e a umidade.

O planejamento experimental foi realizado com base nas formulações das massas cerâmicas, tendo como fatores de controle a temperatura de queima, com os níveis: 850, 900, 950, 1000, 1100 e 1200 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min; além da composição da formulação. As unidades experimentais estudadas consistiram em 10 (dez) formulações, cada uma com 5 (cinco) corpos de prova idênticos, totalizando 30 (trinta) corpos de prova. Estes foram submetidos simultaneamente à mesma temperatura e taxa de aquecimento, com as propriedades de resposta de interesse, sendo as análises laboratoriais e os ensaios tecnológicos.

Considerando os níveis de temperatura de queima e as características das matérias-primas, foi estabelecido que os componentes das misturas das formulações podem

conter até 50% de resíduos minerais, desde que haja pelo menos uma argila plástica presente. Isto definiu as restrições nas proporções dos componentes da mistura, conforme especificado na Tabela 1, que destaca as 10 (dez) formulações utilizadas.

Tabela 1 – Composição e nomenclatura das formulações.

Formulações	Composições	
	Argila (%)	Resíduo (%)
A	100	0
<i>Formulação C – Resíduo do Garimpo de Carnaíba</i>		
C	0	100
C ₁₀	90	10
C ₂₀	80	20
C ₃₀	70	30
C ₄₀	60	40
C ₅₀	50	50
<i>Formulação S – Resíduo do Garimpo de Socotó</i>		
S	0	100
S ₁₀	90	10
S ₂₀	80	20
S ₃₀	70	30
S ₄₀	60	40
S ₅₀	50	50

Fonte: Elaborado pela autora.

A preparação de cada formulação de massa cerâmica consistiu no cálculo preciso do percentual de resíduo mineral necessário em cada mistura. Para determinar a quantidade em peso dos resíduos nas formulações utilizou-se uma balança eletrônica digital (modelo AD-3300) da marca Marte. A escolha desse método fundamenta-se nas características inerentes das matérias-primas utilizadas e em sua aplicação, conforme destacado por Macedo (2007).

Neste estudo foram desenvolvidas um total de 13 (treze) formulações, abrangendo 5 (cinco) misturas de argila com resíduo proveniente do Garimpo de Carnaíba, 5 (cinco) misturas de argila com resíduo proveniente do Garimpo de Socotó, 1 (uma) formulação composta apenas pelo resíduo de esmeralda do Garimpo de Carnaíba, 1 (uma) formulação composta apenas pelo resíduo de esmeralda do Garimpo de Socotó e 1 (uma) formulação utilizando apenas argila.

3.3.2 Preparação das Matérias-Primas

A seguir são apresentadas as principais etapas do processo de preparação das matérias-primas utilizadas nesta pesquisa. A preparação de todas as amostras foi realizada no Laboratório de Mineração do Instituto Federal da Bahia (IFBA) – *Campus* Jacobina.

Secagem: os resíduos minerais e a argila passaram por um processo inicial de secagem em estufa, mantida a uma temperatura de 60°C por um período de 24 horas, visando à eliminação da umidade superficial. Posteriormente foram encaminhados para a fase de processamento experimental.

Classificação e Cominuição: a etapa de classificação e cominuição da argila foi conduzida de forma seca, manualmente, utilizando um almofariz com pistilo; conforme a Figura 18 (A). Durante esse processo tomou-se o cuidado de eliminar todas as impurezas presentes, evitando-se possíveis contaminações.

No caso dos resíduos minerais provenientes da exploração de esmeraldas foram submetidos a um processo a seco, utilizando um moinho de bolas do tipo excêntrico (modelo SL-34/3) da marca Solab; como mostra a Figura 18 (B). Posteriormente, passaram por tratamento no almofariz com pistilo para desaglomerar o material formado.

Figura 18 – Em (A) Tratamento no almofariz da argila e dos resíduos minerais e (B) Resíduo de esmeralda no moinho de bolas para o processo de cominuição.

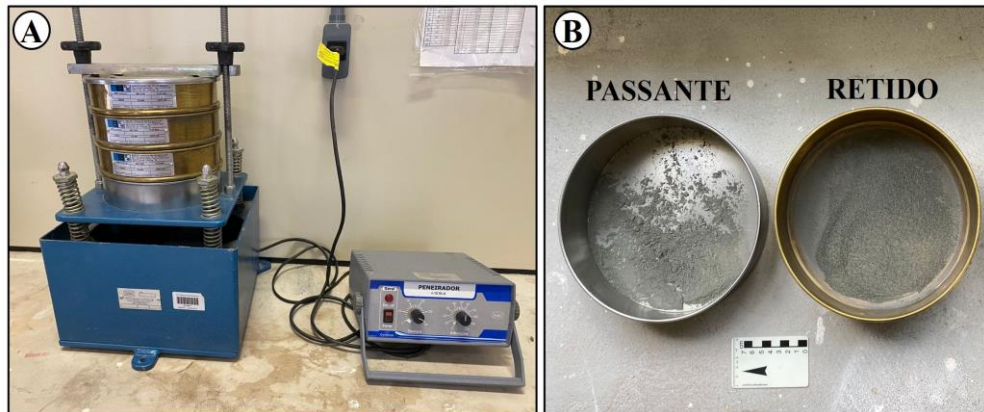


Fonte: Autora.

Peneiramento: a etapa de peneiramento da argila e dos resíduos de esmeralda foi conduzida de forma seca por movimentos vibratórios em um peneirador (modelo I-1016-A) da marca Contenco. Utilizou-se como peneira principal a com abertura de 74 μm ,

correspondente à peneira ABNT nº 200, conforme mostra a Figura 19 (A). Na Figura 19 (B) observa-se o peneiramento do resíduo de esmeralda retido e o passante, para essa pesquisa se utilizou o material passante na peneira de nº 200. Após a conclusão dessa fase a argila e os resíduos foram acondicionados para a próxima etapa do processo.

Figura 19 – Em (A) Processo de peneiramento da argila e dos resíduos minerais e (B) material retido e passante na peneira nº 200.



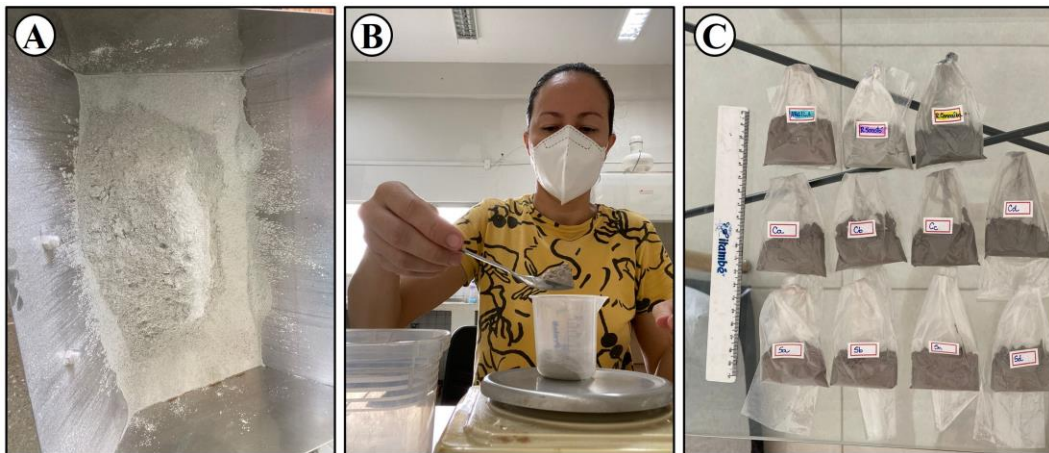
Fonte: Autora.

3.3.3 Formulação dos Corpos de Prova

Além dos processos previamente mencionados foram necessárias etapas adicionais para a obtenção dos corpos de prova utilizados nesta pesquisa. Os corpos de prova foram confeccionados com auxílio dos equipamentos do Laboratório de Mineração do Instituto Federal da Bahia (IFBA) – *Campus* Jacobina.

Mistura e Homogeneização: na elaboração das formulações os percentuais de argila e resíduo de esmeralda foram combinados conforme indicado na Tabela 1. A mistura foi realizada em um moinho de bolas do tipo excêntrico (modelo SL-34/3) da marca Solab, com duração de 15 minutos para cada composição; como evidencia a Figura 20 (A). Após a conclusão e completa homogeneização a seco, observamos na Figura 20 (B) a quantificação das formulações (12g para cada corpo de prova). Depois as amostras foram umedecidas com água destilada (aproximadamente 10% em peso) para adquirir consistência plástica e armazenadas em sacos plásticos, conforme Figura 20 (C); facilitando o processo de conformação.

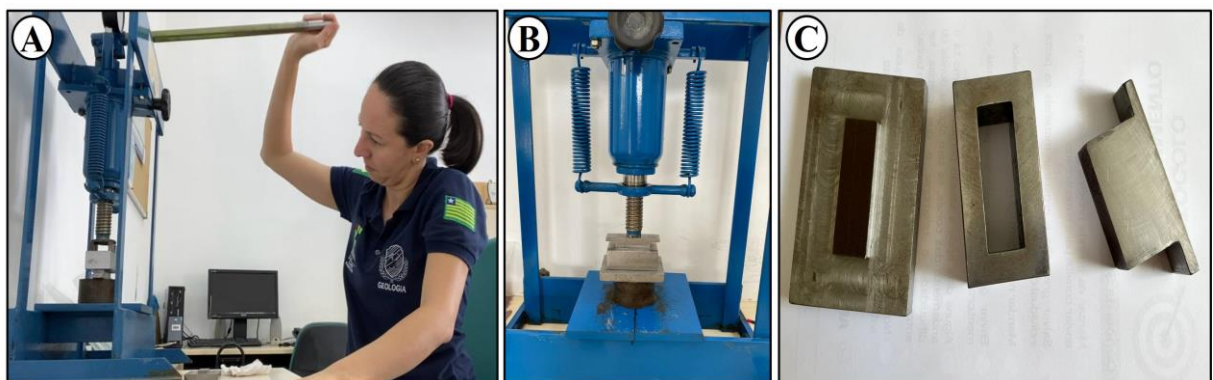
Figura 20 – Em (A) Mistura e homogeneização das matérias-primas; (B) quantificação de cada amostra por formulação, e; (C) armazenamento das amostras já umidificadas.



Fonte: Autora.

Conformação por Prensagem: a conformação da massa cerâmica foi executada por meio de prensagem uniaxial, utilizando uma prensa hidráulica (modelo P10000) da marca Bonevau, com capacidade para 15 toneladas. Esse processo pode ser observado na Figura 21 (A) e (B). Para a prensagem dos corpos de prova foi utilizada uma matriz metálica, conforme mostra a Figura 21 (C). A pressão de compactação empregada foi de 5 MPa, aplicada durante 30 segundos.

Figura 21 – Em (A) e (B) temos o processo de conformação por prensagem das amostras, e em (C) matriz metálica utilizada para conformação dos corpos de prova.



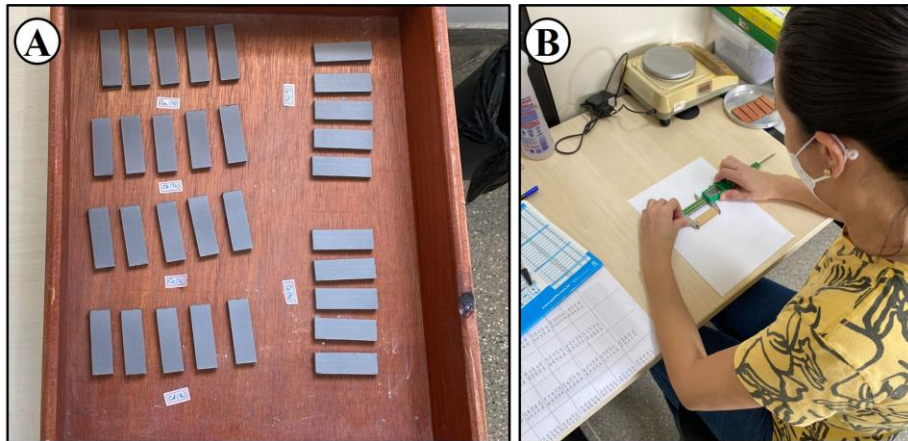
Fonte: Autora.

Os corpos de prova foram confeccionados no processo de compactação com as dimensões de 60 mm de comprimento, 20 mm de largura e 6 mm de altura; utilizando 12 g de massa cerâmica para cada corpo de prova. Neste estudo foram confeccionados 30 corpos de

prova para cada formulação das misturas, bem como a formulação A da argila e 15 corpos de prova para cada formulação C e S; totalizando 360 unidades.

Secagem: após a compactação dos corpos de prova, conforme Figura 22 (A), estes foram submetidos a um processo de secagem em estufa, mantida a uma temperatura de 110°C, por um período de 24 horas. Depois da fase de secagem procedeu-se a medição e pesagem das amostras, como mostra a Figura 22 (B), e posteriormente enviados para a queima.

Figura 22 – Em (A) secagem das amostras após o processo de compactação, e (B) pesagem e medição dos corpos de prova antes da queima.



Fonte: Autora.

3.3.4 Processos Térmicos

A queima dos corpos de prova foi realizada em um forno tipo mufla (modelo Q318M25T) da marca Quimis, com taxa de aquecimento de 10°C/min. O ciclo térmico incluiu uma isoterma de 1 hora nas temperaturas de 850°C, 900°C, 950°C, 1000°C, 1100°C e 1200°C. Em seguida foram deixados no interior do forno até atingirem a temperatura ambiente. E, por fim, as amostras foram medidas e pesadas.

Essa etapa da pesquisa foi realização em parceria com o Laboratório de Mineração do Instituto Federal da Bahia (IFBA) – *Campus* Jacobina e o Laboratório de Degradação e Estabilização e Compostos (LabDEC) da Universidade de Brasília (UnB).

3.3.5 Caracterização das Matérias-Primas

A finalidade da caracterização das matérias-primas consistiu em identificar suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e mineralógicas, como detalhado a seguir.

Análise Granulométrica: essa fase compreende a determinação das dimensões das partículas presentes nas amostras, representativas dos sedimentos, seguida pelo tratamento estatístico dessas informações. Em essência, o procedimento consistiu em determinar as dimensões individuais das partículas e examinar sua distribuição, considerando tanto o peso quanto o volume de cada classe dimensional; bem como o número de partículas contidas em cada classe.

Análise da Plasticidade: esta característica é de elevada relevância para as argilas, especialmente aquelas classificadas como solos de textura fina. Devido à configuração lamelar das partículas de argila é possível que ocorra deslocamento das partículas sem alteração no volume. Nas argilas cauliniticas, caracterizadas pela forma hexagonal de suas partículas, a plasticidade é menos pronunciada. As propriedades plásticas, essencialmente, dependem do teor de umidade, da forma das partículas, granulometria e composição química e mineralógica.

O índice de plasticidade é definido como a diferença entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP). Conforme apontado por Lodi (2000), os intervalos do Índice de Plasticidade (IP) para a classificação das argilas são os seguintes:

- $IP = 0$: Não Plástico
- $1 < IP < 7$: Pouco Plástico
- $7 < IP < 15$: Plasticidade Média
- $IP > 15$: Muito Plástico

A avaliação da plasticidade da argila em estudo será realizada utilizando o método de Atterberg (CAMPOS *et al.*, 1999). Para esta pesquisa, foram adotadas as normas NBR 6457 (2016) para a preparação das amostras, NBR 6459 (2016) para a determinação do limite de liquidez (LL) e NBR 7180 (2016) para a determinação do limite de plasticidade, os ensaios foram realizados pelo Laboratório Controle Tecnológico (CP).

Análise Química por Fluorescência de Raios X (FRX): a composição química dos resíduos minerais e da argila foi determinada utilizando a técnica analítica de Fluorescência

de Raios X (FRX). As amostras foram analisadas antes e após a etapa de queima. Para melhorar a qualidade dos grãos, as amostras foram peneiradas em uma peneira com abertura de 74 μm , correspondente à peneira ABNT n° 200.

As medições de fluorescência de raios X foram realizadas no Laboratório de Raios X do Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (Crti) da Universidade Federal de Goiás (UFG), utilizando um espectrômetro WDS Bruker S8 Tiger, equipado com tubo de Rh. Para a análise dos elementos maiores, a calibração foi efetuada com o pacote GeoQuant M[®] da Bruker, que inclui padrões de rochas e minerais naturais. Os resultados obtidos para os óxidos principais foram expressos em porcentagem (%) de massa, em base úmida. A quantificação dos resultados para o óxido de molibdênio foi realizada utilizando o pacote de análise semiquantitativa Quant-Express[®] da Bruker.

No caso da análise dos elementos menores, os resultados foram obtidos utilizando o pacote de curvas GeoQuant T[®] da Bruker. Os elementos menores foram expressos em partes por milhão (ppm).

Análise Mineralógica por Difração de Raios X (DRX): para a determinação da composição mineralógica das amostras estudadas, empregou-se a técnica analítica de difração de raios X (DRX) nas amostras de argila, resíduos minerais e nas formulações antes e após a etapa de queima. Para a análise das peças após a queima, as mesmas foram trituradas e peneiradas em uma peneira ABNT n°200 com abertura de 74 μm .

As análises foram realizadas no Laboratório de Raios X do Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (Crti) da Universidade Federal de Goiás (UFG), utilizando um difratômetro Bruker D8 Discover. A radiação monocromática foi fornecida por um tubo com anodo de cobre, acoplado a um monocromador Johansson para $K\alpha_1$, operando a 40kV e 40mA. A configuração utilizada foi Bragg-Brentano θ - 2θ , com detector unidimensional Lynxeye[®], cobrindo um intervalo de 2θ de 3° a 100°, com passo de 0,01°. As amostras foram mantidas em rotação a 15 rpm durante as medições.

Na identificação das fases cristalinas foram utilizados os padrões de difratometria de cristais PDF2, com auxílio do software X'Pert HighScore. Esse software compara as posições dos picos do difratograma obtido na análise de difração de raios X com as fases disponíveis em sua biblioteca, permitindo a determinação das fases presentes na amostra. A existência de uma fase cristalina foi confirmada pela sobreposição dos três primeiros picos principais de cada fase cristalina padrão.

Análise Térmica (DSC/TG): a análise térmica das amostras foi realizada utilizando Termogravimetria (TG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (Crti) da Universidade Federal de Goiás (UFG), empregando um equipamento Netzsch STA 449 F3 Nevio.

As amostras foram peneiradas utilizando uma peneira ABNT nº 200 com abertura de 74 µm, para garantir a qualidade da análise. O ensaio foi conduzido sob fluxo de gás de nitrogênio (50 mL/min) e oxigênio (50 mL/min), utilizando cadinhos de alumina de 85 µL (abertos), contendo uma quantidade específica da matéria-prima. A taxa de aquecimento adotada durante a análise foi de 10 °C/min, iniciando-se em temperatura ambiente (30 °C) e prosseguindo até a temperatura final de 1000 °C.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): a técnica de microscopia eletrônica de varredura foi empregada para identificar as características morfológicas superficiais dos minerais nas amostras de argila e nas formulações analisadas após a etapa de queima.

As imagens foram obtidas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Jeol IT300LV operando em baixo vácuo, com tensão de aceleração de elétrons de 15 e 25 kV no modo de detecção de elétrons retroespalhados (BED).

As análises composicionais foram realizadas pela técnica de espectroscopia por dispersão de energia (EDS), com um detector de raios - X Oxford Instruments XMax-n 80 acoplado ao microscópio.

As análises foram realizadas no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (Crti) da Universidade Federal de Goiás (UFG).

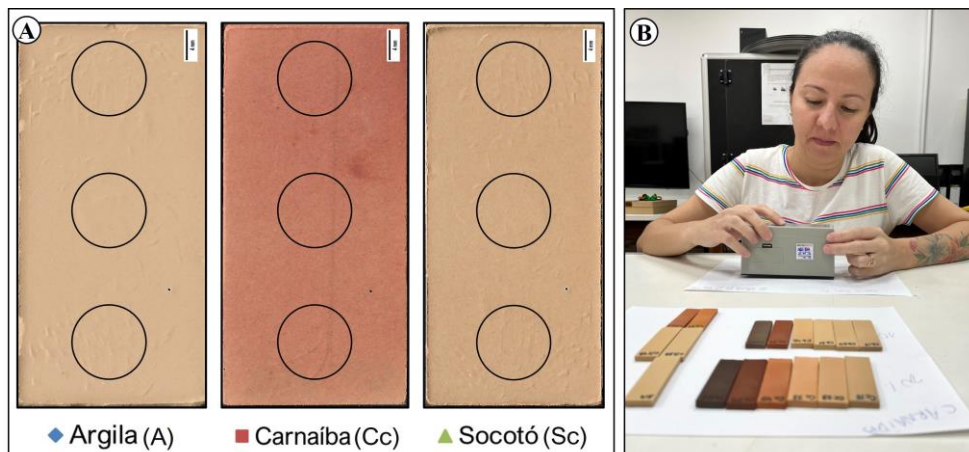
3.3.6 Análise da Coloração

Após os ensaios e as análises realizadas os corpos de prova foram preparados para a análise da coloração, conforme detalhado a seguir.

Determinação da Intensidade do Brilho: para essa análise empregou-se um conjunto de 18 (dezoito) corpos de prova, sendo 3 (três) amostras de cada formulação estudada. Em cada um dos 18 (dezoito) corpos de prova foi demarcado um círculo com um diâmetro de 1,0 cm; conforme mostra a Figura 23 (A). Essa técnica foi adotada devido a heterogeneidade do material. Foi realizado três leituras em cada amostra para mensurar a intensidade inicial de brilho, utilizando o aparelho medidor de brilho digital Glossmeter

(modelo MTK-1260) da marca Metrotokyo, com um ângulo de leitura de 60°. A realização da análise pode ser observada na Figura 23 (B).

Figura 23 – Avaliação da intensidade do brilho nas amostras analisadas. Na (A), apresenta-se um exemplo de imagens dos corpos de prova com o gabarito, destacando os círculos que indicam as áreas onde as medidas foram realizadas; e em (B), observa-se a condução da análise nas amostras.



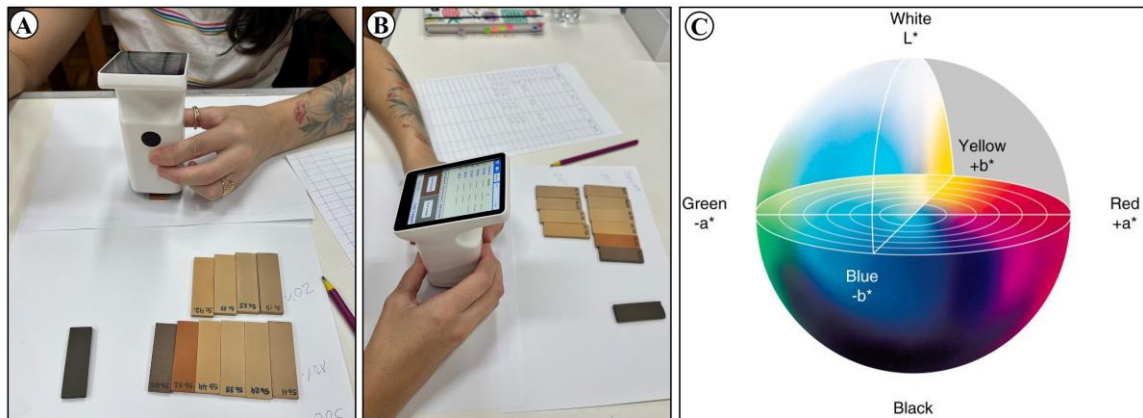
Fonte: Autora.

As medidas de intensidade do brilho foram realizadas após a conclusão do processo de queima dos corpos de prova. Posteriormente, realizou-se o cálculo da média aritmética das leituras da intensidade do brilho e seus respectivos desvio padrão. Em seguida, determinou-se, em termos percentuais, a perda da intensidade do brilho ocorrida em cada amostra em relação à temperatura de queima.

Análise Colorimétrica: a colorimetria representa a ciência dedicada à medição e ao desenvolvimento de métodos para a quantificação das cores, ou seja, à obtenção de valores numéricos que representem as características cromáticas. A cor, por sua vez, é composta por três atributos distintos: tom, saturação e intensidade.

A análise de cor tem como propósito de avaliar a influência da quantidade de óxidos de ferro na coloração das massas cerâmicas e examinar a contribuição das condições de queima na formação da cor dos corpos de prova. Depois do processo de queima dos corpos de prova das massas cerâmicas estudadas, foram determinadas as coordenadas colorimétricas L^* , a^* e b^* utilizando um colorímetro portátil Linshang (modelo LS173B) da marca Andru, conforme visualizado na Figura 24 (A) e (B). Esse aparelho emprega o espaço colorimétrico CIELab (CIE, 1976), com fonte luminosa D65 e um campo de visão de 10°.

Figura 24 – Avaliação colorimétrica nas amostras examinadas. Nas fotos (A) e (B), destaca-se o procedimento das análises de cor sendo realizado nas amostras, enquanto (C) representa o diagrama de cromaticidade, ilustrando as variações de croma e tom.



Fonte: Fotos da autora e diagrama de Gardner (2022).

Após a calibração do equipamento em dois pontos de referência, um preto e outro branco, a análise foi iniciada. As medidas foram realizadas com base nos parâmetros de refletância e colorimétricos determinados pelo sistema CIE L^* , a^* e b^* . No contexto desses parâmetros, o componente L^* indica valores que representam a luminosidade ou claridade, variando entre zero (preto) e cem (branco). Por sua vez, os componentes a^* e b^* definem o diagrama de cromaticidade, representando as variações de croma e tom. Na Figura 24 (C) observamos esse diagrama, onde o parâmetro a^* refere-se aos componentes verde-vermelho, com valores negativos indicando tendência ao verde (-60) e positivos indicando tendência ao vermelho (+60). Já o parâmetro b^* refere-se aos componentes azul-amarelo, com valores negativos indicando tendência ao azul (-60) e positivos indicando tendência ao amarelo (+60) (CIE, 1976).

As medições de cor foram conduzidas em 18 (dezoito) corpos de prova, distribuídos em 3 (três) amostras de cada formulação estudada. Os corpos de prova foram examinados em locais demarcados, conforme gabarito ilustrado na Figura 23 (A).

Os ensaios de Intensidade do Brilho e de Cor foram realizados com auxílio dos equipamentos do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC).

3.3.7 Ensaios Tecnológicos

As características tecnológicas da argila e das formulações contendo os resíduos de esmeralda foram identificadas por meio da análise dos resultados de ensaios de Perda de

Massa ao Fogo (PF%), Retração Linear de Queima (RLq%), Absorção de Água (AA%), Porosidade Aparente (PA%), Massa Específica Aparente (MEA%) e Tensão de Ruptura à Flexão em Três Pontos (TRF). A seguir segue a descrição de cada ensaios.

Perda de Massa ao Fogo (PF): esse ensaio foi representado através do cálculo de Perda de Massa ao Fogo, sendo os resultados obtidos pela média aritmética dos corpos de prova, através da Equação 1.

$$PF = \frac{Ms - Mq}{Ms} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

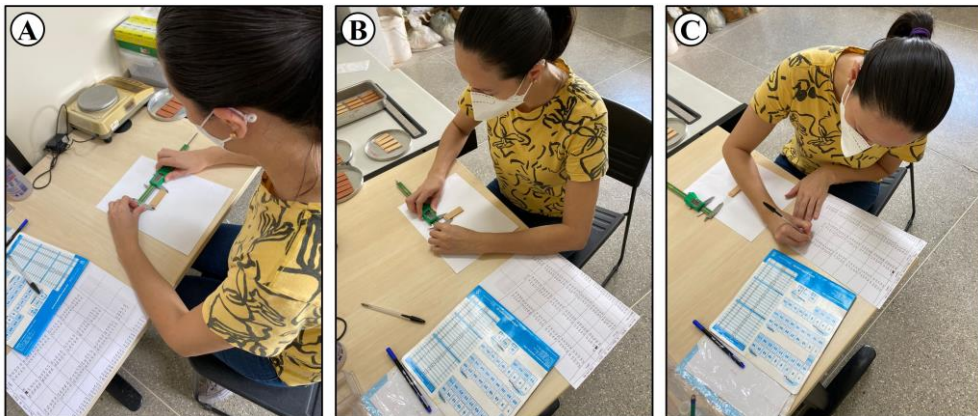
PF – Perda de massa ao fogo (%);

Ms – Massa do corpo de prova após secagem a 110°C (g);

Mq – Massa do corpo de prova após a queima (g).

Retração Linear de Queima (RLq): representa a alteração percentual na dimensão linear do corpo de prova após ser submetido a condições específicas de temperatura. Para esta medida as dimensões dos corpos de prova foram determinadas antes, após a secagem a 110 °C durante 24 horas, e após a queima. As Figuras 25 (A), (B) e (C) demonstram a verificação das dimensões dos corpos de prova.

Figura 25 – Em (A) são registradas as medições de comprimento; (B) são realizadas as medições de largura; e (C) é feito o registro das medidas antes e após a queima das amostras.



Fonte: Autora.

A Equação 2 expressa os parâmetros para a condução deste ensaio.

$$RLq = \frac{C_s - C_q}{C_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

RLq – Retração linear de queima (%);

Cs – Comprimento do corpo de prova após secagem a 110°C (mm);

Cq – Comprimento do corpo de prova após a queima (mm).

Absorção de Água (AA): a análise dos corpos cerâmicos foi conduzida conforme os procedimentos delineados na norma NBR 10545-3 (2020). Para a realização deste ensaio, foram empregados cinco corpos de prova de cada formulação, uma balança eletrônica digital (modelo AD-3300) da marca Marte, uma estufa digital (modelo SP-100) da marca SPLabor e um recipiente plástico utilizado como tanque de imersão; conforme demonstra as Figuras 26 (A), (B), (C) e (D).

Figura 26 – Execução do ensaio de absorção de água. Em (A) e (B) pesagem do corpo de prova imerso em água, pelo método da balança hidrostática; (C) corpos de prova no recipiente plástico, utilizado como tanque de imersão, onde permaneceu por um período de 24h; e (D) pesagem novamente dos corpos de prova após o período de imersão.



Fonte: Autora.

O índice de absorção de água foi calculado por meio da aplicação da Equação 3.

$$AA = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

AA – Absorção de água (%);

Mu – Massa do corpo de prova saturado de água (g);

Ms – Massa do corpo de prova seco (g).

Porosidade Aparente (PA): expressa a relação entre o volume de poros abertos do corpo de prova e seu volume total. A porosidade aparente dos corpos cerâmicos sinterizados foi avaliada seguindo os procedimentos delineados na norma NBR 10545-3 (2020), conforme indicado na Equação 4.

$$PA = \frac{Mu - Ms}{Mu - Mi} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

PA – Porosidade aparente (%);

Mu – Massa do corpo de prova úmido (g);

Ms – Massa do corpo seco (g);

Mi – Massa do corpo de prova imerso em água, que foi medida pelo método da balança hidrostática (g).

Massa Específica Aparente (MEA): representa o valor da massa por unidade de volume, dos corpos de prova. O resultado dessa técnica é obtido através da Equação 5.

$$MEA = \frac{Ms}{Mu - Mi} \times d \quad (5)$$

Onde:

MEA – Massa específica aparente (g/cm³);

Mu – Massa do corpo de prova úmido (g);

Mq – Massa do corpo de prova sinterizado (g);

Mi – Massa do corpo de prova imerso em água (g);

d – Densidade do líquido usado (água = 1,0g/cm³ à 25°C).

Tensão de Ruptura à Flexão (TRF): os testes de resistência à flexão em três pontos são executados em corpos de prova em forma de barra. Inicialmente o corpo de prova é suportado por dois cutelos e, em seguida, uma carga crescente é aplicada na superfície superior do corpo de prova em um ponto equidistante aos dois apoios inferiores (cutelos). A força é incrementada gradualmente até que ocorra a ruptura (TORQUATO, 2005). Para determinar a resistência à flexão em três pontos, os ensaios foram conduzidos conforme as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 10545-4 (2020), utilizando a Equação 6 para calcular a carga de ruptura à flexão em três pontos.

$$TRF = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (6)$$

Onde:

TRF – Tensão de ruptura à flexão (N);

P – Carga obtida no momento da ruptura do corpo de prova (N);

L – Distância entre os pontos de apoio dos corpos de prova (mm);

b – Largura do corpo de prova no local da ruptura (mm);

h – Altura do corpo de prova no local da ruptura (mm).

Os ensaios tecnológicos foram realizados em parceria com o Laboratório de Mineração do Instituto Federal da Bahia (IFBA) – *Campus* Jacobina e o Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade de Brasília (UnB).

4 ANÁLISE MULTIDIMENSIONAL DA ARGILA DE UMBUZEIRO-BA: PROPRIEDADES MINERALÓGICA, FÍSICO-QUÍMICA E TECNOLÓGICA PARA USO CERÂMICO

RESUMO

Este estudo investiga as características mineralógicas e físico-químicas da argila de Umbuzeiro, Bahia, com o objetivo de avaliar sua adequação como matéria-prima para a produção de cerâmica vermelha e revestimentos cerâmicos de alto desempenho. A argila foi coletada diretamente do depósito e submetida a uma série de análises, incluindo difração de raios - X (DRX), fluorescência de raios - X (FRX), análise da microestrutura (MEV), análises térmicas (TG e DSC) e testes de plasticidade. As amostras foram processadas e queimadas em diferentes temperaturas (850, 900, 950, 1000, 1100 e 1200 °C) para investigar a evolução térmica e as fases cristalinas formadas, como quartzo, caulinita, mulita e cristobalita. Os resultados mostraram que a argila apresenta plasticidade moderada, sendo adequada para extrusão e conformação de peças cerâmicas. Em temperaturas superiores a 1000 °C, a densificação da argila torna-se significativa, com diminuição na absorção de água e aumento da retração linear, características essenciais para a fabricação de porcelanatos e produtos cerâmicos de alto desempenho, conforme normas ISO 13006 e ABNT NBR 13818. Abaixo dessa temperatura, a argila se mostrou adequada para a produção de cerâmica vermelha, atendendo aos requisitos da ABNT NBR 15270 para blocos e telhas. Conclui-se que a argila de Umbuzeiro é uma matéria-prima promissora para a indústria da construção civil, com potencial para a produção de materiais de maior valor agregado. Os resultados também sugerem a necessidade de estudos futuros em escala semi-industrial para otimizar suas propriedades térmicas e mecânicas.

Palavras-chave: cerâmica; propriedades termomecânicas; caracterização tecnológica.

ABSTRACT

This study investigates the mineralogical and physico-chemical characteristics of Umbuzeiro clay, Bahia, aiming to assess its suitability as a raw material for the production of red ceramics and high-performance ceramic coatings. The clay was collected directly from the

deposit and subjected to a series of analyses, including X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), microstructure analysis (SEM), thermal analyses (TG and DSC), and plasticity tests. The samples were processed and fired at different temperatures (850, 900, 950, 1000, 1100, and 1200 °C) to investigate the thermal evolution and the crystalline phases formed, such as quartz, kaolinite, mullite, and cristobalite. The results showed that the clay has moderate plasticity, being suitable for extrusion and shaping of ceramic pieces. At temperatures above 1000 °C, the densification of the clay becomes significant, with a decrease in water absorption and an increase in linear shrinkage, essential characteristics for the manufacture of porcelain tiles and high-performance ceramic products, according to ISO 13006 and ABNT NBR 13818 standards. Below this temperature, the clay proved to be suitable for the production of red ceramics, meeting the requirements of ABNT NBR 15270 for blocks and tiles. It is concluded that Umbuzeiro clay is a promising raw material for the construction industry, with potential for the production of higher value-added materials. The results also suggest the need for future studies on a semi-industrial scale to optimize its thermal and mechanical properties.

Keywords: ceramics; thermomechanical properties; technological characterization.

4.1 Introdução

As argilas têm sido amplamente utilizadas como matéria-prima ao longo da história, desempenhando um papel essencial na humanidade. Mesmo com o desenvolvimento de novos materiais, a argila continua sendo um recurso fundamental na construção civil, especialmente na fabricação de blocos, telhas, tijolos e outros produtos cerâmicos (SETZ; Da SILVA, 2019; MANOHARAN *et al.*, 2011). Suas propriedades favoráveis, como plasticidade, tixotropia e compactação, tornam a argila indispensável para a indústria cerâmica contemporânea. Essas características são determinadas pela composição mineralógica, que varia conforme a origem geológica das jazidas, impactando diretamente a qualidade dos produtos cerâmicos (KUMARI; MOHAN, 2021).

A incorporação de argilas em massas cerâmicas está diretamente relacionada à sua capacidade de conferir plasticidade e resistência, influenciando o processo de sinterização. Minerais como a caulinita são essenciais para a plasticidade da massa, enquanto agentes fundentes, como o feldspato e a dolomita, ajudam a reduzir a temperatura de sinterização, otimizando o processo de fabricação. A sinterização, que ocorre entre 800 e 1700 °C, é crucial

para determinar as propriedades finais da cerâmica, como densidade, resistência mecânica e porosidade, além de impactar os custos energéticos da produção (MANOHARAN *et al.*, 2011; BARSOUM, 2019).

Na região de Umbuzeiro, Bahia, os depósitos de argila aluvial ainda não são explorados nem utilizados comercialmente em larga escala, permanecendo sem aproveitamento significativo para aplicações industriais. Embora essa argila tenha um grande potencial para a expansão da produção cerâmica na região, há uma carência de estudos científicos sobre suas propriedades físico-químicas e mecânicas. A ausência de dados resulta em desafios durante o processo de fabricação, como deformações e quebras, que restringem seu uso a produtos de menor valor agregado, como tijolos de alvenaria (MANOHARAN *et al.*, 2011). Assim, é essencial realizar uma caracterização detalhada dessa argila, levando em consideração suas propriedades mineralógicas e térmicas em diferentes temperaturas de queima, para melhorar sua aplicação e a qualidade dos produtos cerâmicos.

Diante desse contexto, este estudo visa analisar de forma abrangente as características mineralógicas e físico-químicas da argila de Umbuzeiro, com o objetivo de avaliar sua adequação como matéria-prima para a indústria cerâmica. A caracterização precisa dessas propriedades permitirá otimizar o processo produtivo e expandir o uso dessa argila para produtos cerâmicos de maior valor agregado, contribuindo para o desenvolvimento econômico e tecnológico da região.

4.2 Materiais e Métodos

A argila utilizada nesta pesquisa foi coletada diretamente do depósito localizado na Fazenda Caldeirão da Errada, no Distrito de Umbuzeiro, Bahia. A amostra foi obtida manualmente e, para assegurar sua representatividade, foi completamente homogeneizada, garantindo assim amostras estatisticamente válidas para as avaliações laboratoriais. Essas avaliações incluem tanto estudos de caracterização quanto ensaios tecnológicos.

Atualmente, a argila dessa área não é utilizada como matéria-prima em indústria cerâmica. Este estudo tem como objetivo caracterizar a argila para que possa ser empregada pelas empresas locais na fabricação de peças cerâmicas (tijolos, telhas e etc.).

Macroscopicamente, a argila apresenta coloração cinza escuro a preta e uma textura lutítica, caracterizada pela presença abundante de argilominerais com granulometria predominante de silte fino, variando entre 4 e 6 μm . Sua estrutura é anisotrópica, porém exibe homogeneidade tanto estrutural quanto textural. Devido à granulometria extremamente fina, a

argila possui uma textura maciça, na qual não é possível observar a orientação dos constituintes a olho nu.

4.2.1 Caracterização da argila

A argila passou por um processo inicial de secagem em estufa, mantida a uma temperatura de 60 °C por um período de 24 horas, visando à eliminação da umidade superficial. Posteriormente, a matéria-prima foi moída a seco em moinho de bolas com esferas de aço por 30 minutos e, em seguida, passada através de uma peneira ABNT nº 200 com abertura de 74 µm. Após esse tratamento inicial, a argila foi caracterizada por difração de raios - X (DRX), análise química por fluorescência de raios - X (FRX), análise termogravimétrica (TG e DSC) e determinação da plasticidade.

O comportamento térmico da argila foi determinado utilizando-se um analisador térmico Netzsch STA 449 F3 Nevio, sob fluxo de gás nitrogênio, em uma faixa de temperatura de 30 a 1000 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min.

A composição mineralógica da argila natural e a identificação e quantificação das fases minerais das amostras queimadas a 850, 900, 950, 1000, 1100 e 1200 °C foram avaliadas em um difratômetro Bruker D8 Discover, utilizando radiação monocromática de um tubo com ânodo de cobre acoplado a um monocromador Johansson para $K\alpha_1$. O equipamento operou a 40 kV e 40 mA, cobrindo um intervalo de 2θ de 3° a 100°, com passo de 0,01°.

Para a identificação das fases cristalinas, foram utilizados os padrões de difratometria de cristais PDF2, com auxílio do software X'Pert HighScore. Esse software compara as posições dos picos do difratograma obtido na análise de DRX com as fases disponíveis em sua biblioteca, permitindo a determinação das fases presentes na amostra. A presença de uma fase cristalina foi confirmada pela sobreposição dos três primeiros picos principais de cada fase cristalina padrão.

A composição química foi determinada por fluorescência de raios - X (FRX), utilizando o espectrômetro WDS Bruker S8 Tiger com um tubo de raios X de Rh. Para a análise dos elementos maiores, a calibração foi realizada com o pacote GeoQuant M® da Bruker, que inclui padrões de rochas e minerais naturais.

O índice de plasticidade (IP) da argila foi determinado pelos limites de Atterberg: limite de plasticidade (PL) e limite de liquidez (LL) de acordo com as normas NBR 7180:2016 e NBR 6459:2016.

4.2.2 Preparação e estudo das propriedades dos corpos de prova cerâmicos

A matéria-prima seca foi umedecida com 10 % em peso de água e homogeneizada manualmente. A mistura resultante foi prensada uniaxialmente em uma matriz metálica utilizando uma prensa hidráulica manual (BONEVAU P10000), com uma pressão de compactação de 5 MPa aplicada durante 30 segundos. Foram produzidos trinta corpos de prova retangulares, cada um com dimensões de 60 mm × 20 mm × 6 mm.

Depois da conformação, os corpos de prova foram secos em estufa a uma temperatura aproximada de 110 °C por um período de 24 horas. Após a etapa de secagem, as amostras foram medidas com o auxílio de um paquímetro digital, com precisão de 0,01 mm, e pesadas em uma balança com precisão de 0,001 g.

A etapa de queima dos corpos de prova foi realizada em um forno tipo mufla (QUIMIS Q318M25T), sob diferentes temperaturas (850, 900, 950, 1000, 1100 e 1200 °C) por uma hora, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e resfriamento até a temperatura ambiente dentro do próprio forno. Em seguida, os corpos de prova foram novamente medidos e pesados, e suas propriedades tecnológicas foram avaliadas.

A coloração das amostras queimadas foi determinada por comparação visual e análise de cor utilizando o sistema CIELab.

Em relação aos ensaios tecnológicos, a retração linear foi calculada com base nas medições de comprimento dos corpos de prova antes e depois dos processos de secagem e queima (SANTOS, 1989). Os valores de absorção de água foram obtidos através da medição das diferenças de massa entre as amostras queimadas e as saturadas com água, após imersão por 24 horas e secagem superficial com uma toalha úmida (SANTOS, 1989).

O ensaios de resistência à flexão foi medida por meio do teste de flexão de três pontos, realizado em uma máquina de ensaios EMIC (DL-10000), com capacidade de 100 kN, conforme a norma NBR ISO 10545-4:2020.

A análise da microestrutura foi realizada a partir das superfícies dos corpos de prova, utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) de bancada JEOL IT300LV, operando a uma tensão de aceleração de 15 e 25 kV.

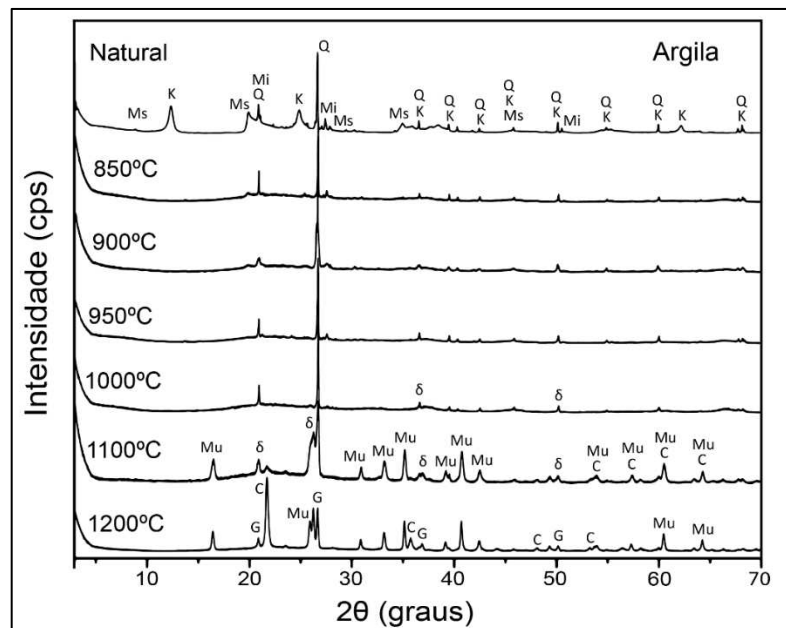
Os dados obtidos a partir das propriedades físicas e tecnológicas das amostras foram apresentados considerando a média e o desvio padrão de cada conjunto de cinco corpos de prova.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Análise mineralógica e química

A composição mineralógica da argila tem importante impacto nas propriedades do produto e em seu processo de fabricação. Na Figura 27 tem-se os resultados de DRX das amostras de argila natural e queimadas a 850, 900, 950, 1000, 1100 e 1200 °C, com as fases cristalinas presentes identificadas.

Figura 27 – Difratoograma de raios - X com a evolução térmica e mineralógica da argila pura, antes e após a queima. Fases cristalinas identificadas = Q: Quartzo. Mi: Microclínio. K: Caulinita. Mu: Mulita. Ms: Muscovita. δ : Metacaulinita. C: Cristobalita. G: Gismondina.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na argila natural foi identificada a predominância de quartzo (SiO_2) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), com a presença também de microclínio (KAlSi_3O_8) e muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$). O quartzo, composto por sílica, está coerente com os resultados da análise de composição química. O microclínio é identificado como um silicato de potássio e alumínio, elementos detectados na análise por fluorescência de raios - X. A caulinita é reconhecida pela sua estrutura lamelar, composta por camadas alternadas de octaedros de alumínio e tetraedros de sílica. Já a muscovita é identificada pelo espaçamento entre suas camadas de silicato. A presença dessas fases minerais é fundamental para confirmar a

composição mineralógica da argila destinada ao uso cerâmico, em correlação com os dados provenientes de análises químicas e térmicas (ACEVEDO *et al.*, 2017; MACEDO *et al.*, 2008; SANTOS, 1989).

Na evolução térmica da argila, com temperaturas variando de 850 a 1200 °C, revelou-se a presença das fases minerais mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), cristobalita (SiO_2), metacaulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) e gismondina ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). O aquecimento da argila induz a desidroxilação da caulinita, formando metacaulinita (BRINDLEY; BROWN, 1980; SANTOS *et al.*, 2013; MENSCHAZ *et al.*, 2017).

A temperatura entre 950 e 1100 °C promove a decomposição do quartzo e da metacaulinita, resultando em mulita e cristobalita, conforme corroborado por análises térmicas. A mulita se forma pela reação entre alumina e sílica ($3\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2 \rightarrow 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), discutida em estudos como os de Schneider *et al.* (2008), que destacam seu papel na resistência mecânica e térmica das cerâmicas.

Na temperatura de 1200 °C, parte da sílica amorfa recristaliza formando cristobalita, uma fase polimórfica de alta temperatura do quartzo (YIN *et al.*, 2010). Em um ambiente ainda rico em sílica e alumina, juntamente com a presença de ferro e outros elementos, observa-se a formação de gismondina (mineral do grupo das zeólitas) a partir da metacaulinita e outras fases amorfas, indicando sua estabilidade durante o aquecimento ou recristalização (HAYASHI *et al.*, 1999; XU *et al.*, 2007).

As fases cristalinas identificadas foram consistentes com os resultados da composição química da argila, e a perda por ignição, expressa na forma de óxidos, apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química das matérias-primas estudadas.

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
	% em peso											
A	54,29	28,34	4,35	0,63	<LQ	0,50	<LQ	0,36	1,29	<LQ	10,86	100,62

Fonte: Elaborado pela autora. (<LQ) = Abaixo do limite quantificável. A: Argila.

Na análise química da argila (A), o óxido de silício (SiO_2) apresenta o maior percentual entre os constituintes, seguido pelos óxidos de alumínio (Al_2O_3) e de ferro (Fe_2O_3). A predominância dos óxidos de silício e alumínio sugere sua associação com a estrutura da caulinita, sendo parte desse conteúdo também atribuída à presença de muscovita. A presença de muscovita na argila é corroborada pelo teor de K_2O identificado na composição química da matéria-prima, conforme descrito por Santos (1989).

O teor de SiO_2 está associado às partículas de quartzo, conforme evidenciado pelos padrões de difração de raios - X. A razão molar observada de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ para a argila estudada foi de 1,81, o que indica uma proporção inferior ao valor padrão de 2,00 estabelecido para a caulinita (SCHACKOW *et al.*, 2020). Essa pequena discrepância pode ser atribuída à presença de outros minerais na composição da argila, que substituem parte do SiO_2 ou do Al_2O_3 . Especificamente, a presença de quartzo, microclínio e muscovita pode contribuir para essa variação na razão molar observada.

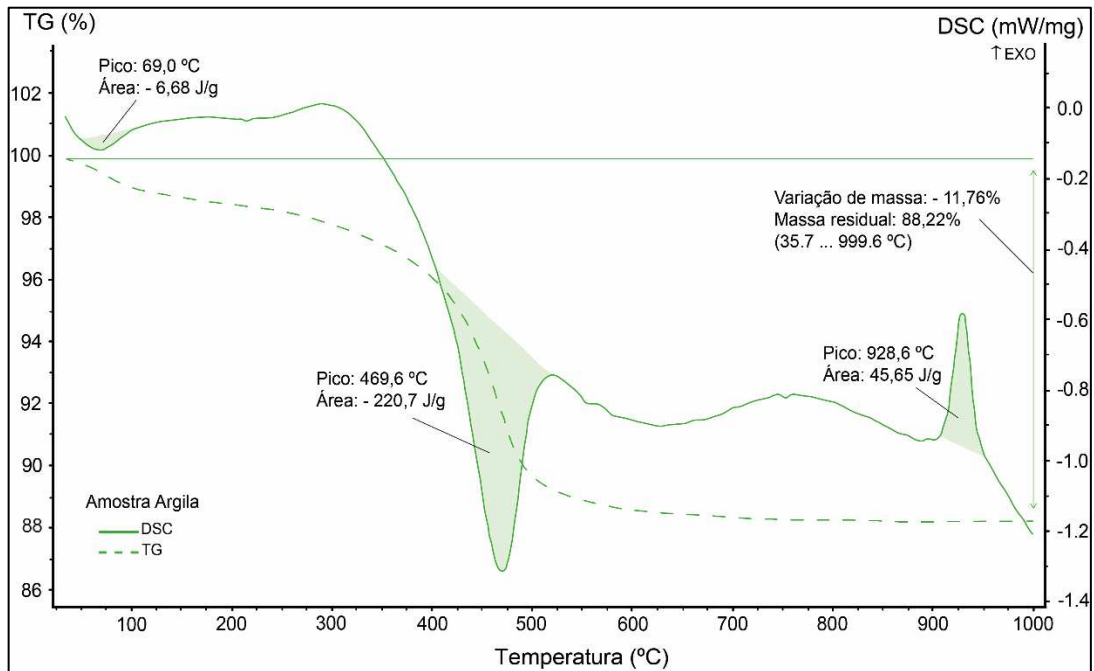
A argila de Umbuzeiro apresenta baixa quantidade de óxidos alcalinos (K_2O e Na_2O), os quais atuam como fundentes, essa é uma característica típica de argila caulinítica (MONTEIRO; VIEIRA, 2004). A quantidade de CaO e MgO também foi baixa, indicando a ausência de carbonatos. Os óxidos de Fe, Mg, Mn e Ti são responsáveis pela coloração de peças de cerâmica. Os óxidos de Fe, Mg, Mn e Ti são responsáveis pela coloração de peças de cerâmica. Os óxidos cromóforos TiO_2 são encontrados em baixos níveis, enquanto os óxidos de ferro (Fe_2O_3) estão presentes em concentrações relativamente médias. Isso sugere que os produtos cerâmicos queimados a temperaturas inferiores a $1100\text{ }^\circ\text{C}$ apresentarão cores claras. Em contraste, a temperaturas superiores a $1100\text{ }^\circ\text{C}$, as peças cerâmicas exibem tonalidades avermelhadas, fenômeno atribuído principalmente à oxidação dos óxidos de ferro.

Na argila analisada, observou-se uma perda ao fogo (LOI) de 10,86 %, a qual pode estar relacionada à desidroxilação dos minerais de argila, oxidação da matéria orgânica, decomposição de carbonatos, sulfetos, hidróxidos, etc. (SANTOS, 1989; MORENO *et al.*, 2016). A variação de massa da argila analisada é discutida de forma detalhada nas análises térmicas.

4.3.2 Análise térmica

A Figura 28 mostra as curvas obtidas por Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC) e Termogravimetria (TG) para a argila de Umbuzeiro.

Figura 28 - Curvas de DSC e TG da argila de Umbuzeiro.

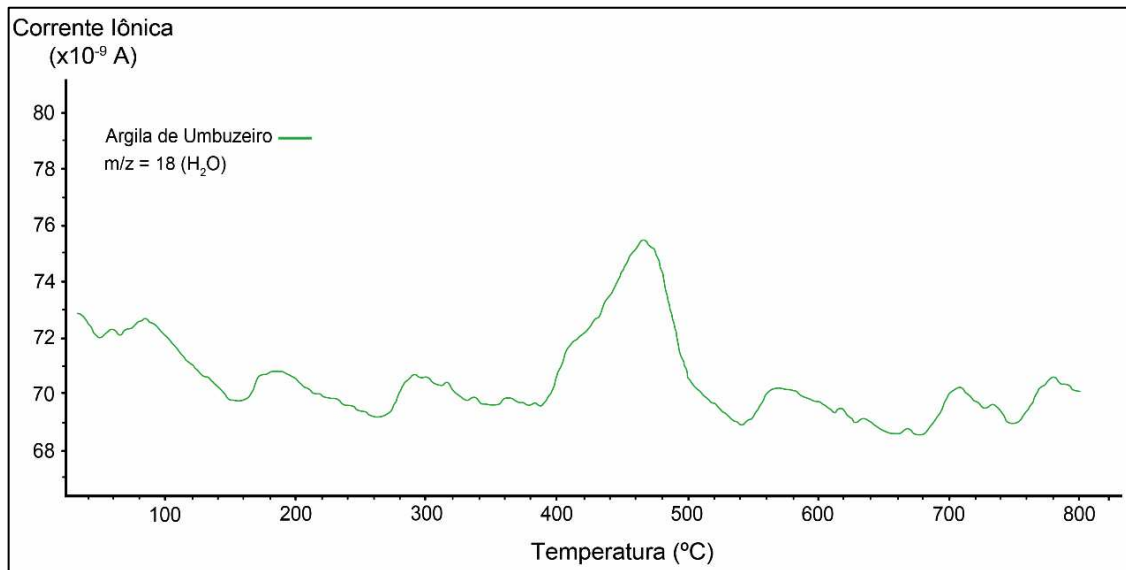


Fonte: Elaborado pela autora.

Entre 54 e 97 °C, observa-se uma perda inicial de massa de 0,68%, que está atribuída à eliminação da água adsorvida e intercamada dos argilominerais. A remoção dessa água leva à coalescência das partículas de argila, devido às forças capilares, resultando na contração do material (SOUSA; HOLANDA, 2005).

No intervalo de temperaturas entre 400 e 500 °C ocorre uma segunda perda de massa de 6,43%, nessas temperaturas ocorrem a perda de grupos hidroxila da estrutura da argila (desidroxilação da caulinita) na forma de água coordenada, que é observado no espectro de massa referente a molécula da água ($m/z=18$), representado na Figura 29.

Figura 29 - Curva de MS da água evoluída ($m/z = 18$) da argila de Umbuzeiro.



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao comparar as temperaturas de desidroxilação da argila deste estudo com as típicas temperaturas de desidroxilação de minerais argilosos descritas na literatura, nota-se que os valores encontrados são próximos a $700\text{ }^{\circ}C - 850\text{ }^{\circ}C$ (LUZ; LINS, 2005). Entretanto, em argilominerais com teores mais elevados em ferro (Fe_2O_3), como é o caso estudado, observa-se a presença de um pico endotérmico intermediário entre as temperaturas de $450\text{ }^{\circ}C - 700\text{ }^{\circ}C$ (AMORIM *et al.*, 2004).

Na Figura 28 verifica-se, ainda, a presença de um pico exotérmico em torno de $930\text{ }^{\circ}C$, observado de forma consistente na argila. Esse fenômeno é uma reação de recristalização dos argilominerais. Esta característica é particularmente notável no contexto da transformação da caulinita em metacaulinita, conforme discutido por Brindley e Brown (1980); Maia *et al.* (2000); Santos *et al.* (2013); Brito (2015); Menshaz *et al.* (2017) na literatura especializada.

A argila caracterizada neste estudo apresentou uma perda ao fogo (LOI) de 10,86%, enquanto as análises térmicas revelaram uma perda de massa total de 11,76%. A afirmação entre esses valores reflete a consistência dos processos de decomposição de componentes voláteis presentes na argila, como matéria orgânica, hidróxidos e carbonatos. Ambos os resultados sugerem que a maior parte dessa perda de massa está relacionada à desidroxilação da caulinita e à liberação de água estrutural dos minerais argilosos durante o aquecimento, além de possíveis decomposições de impurezas. Esses processos são essenciais para

determinar o comportamento térmico da argila em temperaturas elevadas, influenciando sua adequação para aplicações cerâmicas.

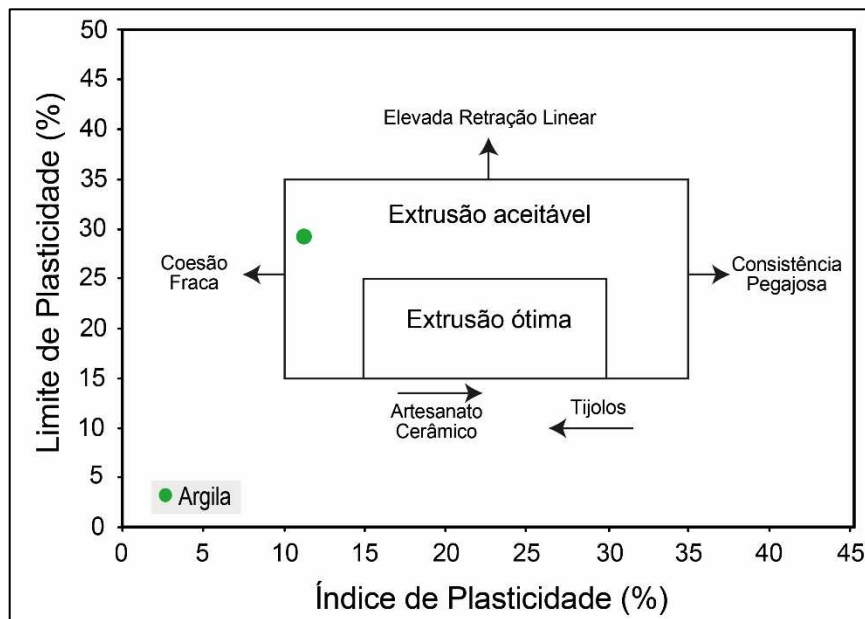
4.3.3 Propriedades tecnológicas

A plasticidade é um dos fatores mais relevantes na fabricação de produtos cerâmicos à base de argila. Os valores obtidos para o limite de plasticidade, limite de liquidez e índice de plasticidade da amostra analisada foram de 29,2%, 40,7% e 11,5%, respectivamente.

O limite de liquidez de 40,7% da argila de Umbuzeiro está em conformidade com a faixa descrita na literatura (30-60%) para massas destinadas à produção de tijolos. O valor do limite de plasticidade de 29,2% também se alinha com os intervalos recomendados (15-30%) para a extrusão de tijolos. Os índices de plasticidade entre 7% e 15% classificam a argila como de plasticidade média, enquanto valores superiores a 15% indicam alta plasticidade (JUNIOR *et al.*, 2012). Segundo os dados disponíveis na literatura, os parâmetros medidos são adequados para a produção de cerâmica vermelha, classificando a argila como moderadamente plástica.

A partir dos Limites de Atterberg obtidos, foi possível realizar uma previsão do processo de extrusão utilizando o gráfico de trabalhabilidade proposto por Bain e Highly (1978), conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 – Resultado dos Limites de Atterberg projetados no gráfico de trabalhabilidade de Bain e Highly (1978) para a argila de Umbuzeiro.



Fonte: Adaptado de Bain e Highly (1978).

Os resultados revelam que a argila investigada está localizada dentro da região de extrusão aceitável. O limite de plasticidade da argila corresponde à quantidade de água necessária para que a matéria-prima atinja a consistência plástica, o que permite sua formação por extrusão. O índice de plasticidade está associado à quantidade máxima de água que pode ser adicionada à argila, a partir de seu limite de plasticidade, de modo que ela mantenha a sua consistência moderadamente plástica. Para fins práticos, um índice de plasticidade de 11,5% é considerado adequado para a produção de cerâmica por extrusão, proporcionando uma boa conformação das peças e garantindo a qualidade dimensional e integridade das peças verdes (DARWEESH, 2001).

A coloração dos corpos de prova teve uma modificação com a elevação das temperaturas de queima, sua matiz e croma variou do bege/creme para alaranjado e, em temperatura de 1200 °C, para um vermelho mais intenso, conforme ilustrado na Figura 31. Essa alteração na cor pode ser atribuída à quantidade de algumas impurezas de óxidos, como óxido de ferro (4,35%) e óxido de titânio (0,63%) presentes.

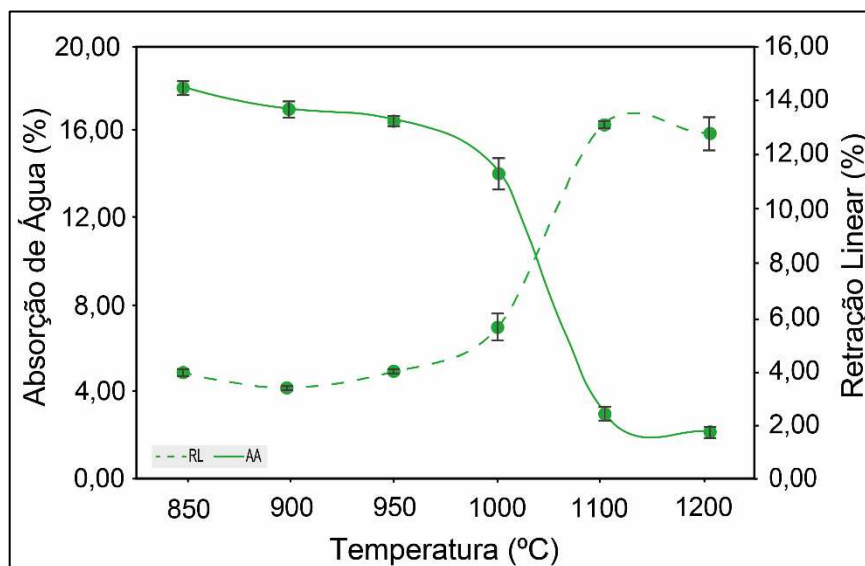
Figura 31 – Coloração dos corpos de prova da argila de Umbuzeiro após o processo de queima.



Fonte: Elaborado pela autora.

A eficiência do processo de sinterização é um outro fator tecnológico relevante, que pode ser analisada pelas curvas de dependência da temperatura para absorção de água e retração linear após queima, conforme mostra a Figura 32, no diagrama de gresificação para a argila de Umbuzeiro.

Figura 32 – Diagrama de gresificação da argila de Umbuzeiro.



Fonte: Elaborado pela autora.

A sinterização da argila torna-se significativa apenas em temperaturas a partir de 1000 °C. Em temperaturas abaixo desses valores, a argila apresenta retração linear de queima pouco expressiva, elevada absorção de água, superior a 15 %, e baixa resistência à flexão,

sugerindo que a microestrutura do material permanece porosa e que a coesão entre as partículas é insuficiente para proporcionar as propriedades mecânicas desejáveis.

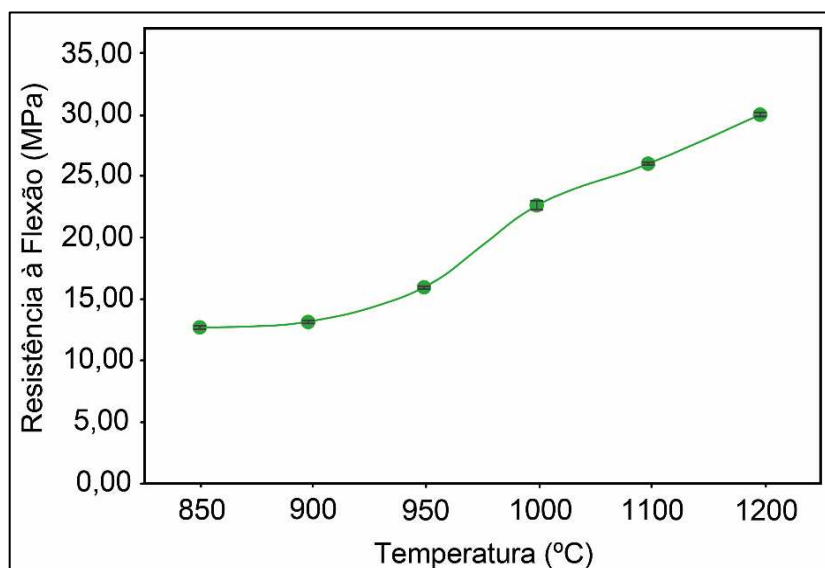
Acima de 1000 °C, as curvas mostram uma mudança repentina que está associada a uma formação de fase líquida mais significativa. Como resultado, a absorção de água diminuiu expressivamente enquanto a retração linear aumentou com o acréscimo da temperatura. A 1200 °C ocorre a retração máxima, sendo esta considerada a temperatura de máxima densificação (REED, 1995).

A absorção de água é o parâmetro da norma NBR ISO 10545-1:2017 usada para definir a classe a que pertencem os revestimentos cerâmicos segundo processo de conformação. Os corpos de prova da argila, queimados a temperaturas entre 850 e 1000 °C apresentaram valores correspondentes à classe BIII (absorção de água > 10%).

No Brasil, a norma técnica NBR 15270-2 define que blocos cerâmicos para alvenaria estrutural devem possuir o índice de absorção de água entre a 8 - 25%, portanto a argila de Umbuzeiro pode produzir tijolos cerâmicos de alvenaria dentro do especificado. Esta argila também se apresenta como potencial para fabricação de telhas cerâmicas, visto que a norma NBR 15310:2009 indica que o limite máximo admissível de absorção de água é de 20%.

A qualidade mecânica em função da temperatura de queima foi investigada em comparação com os valores de resistência à flexão adotados no Brasil, mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Resistência à flexão em função da temperatura para a argila de Umbuzeiro.



Fonte: Elaborado pela autora.

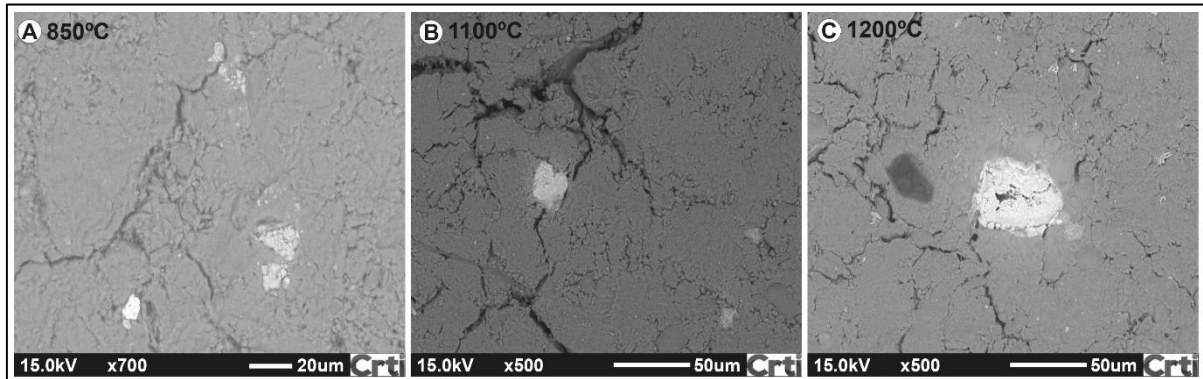
De acordo com a classificação estabelecida pela ISO 13006 para revestimentos cerâmicos, as amostras de argila analisadas podem ser categorizadas em diferentes grupos com base nos valores de absorção de água e resistência à flexão. Abaixo de 1000 °C, os valores de absorção de água superiores a 10% classificam as amostras no Grupo III (faiança), característico de cerâmicas porosas e de menor resistência mecânica, com valores de resistência à flexão entre 12,73 MPa e 22,66 MPa. A partir de 1100 °C, com uma absorção de água inferior a 3%, as amostras são classificadas no Grupo I (porcelanatos), o que indica um material com baixa porosidade e alta resistência mecânica, alcançando valores de até 30,08 MPa, o que as torna adequadas para produtos cerâmicos de alta performance, como pisos e revestimentos de alto tráfego.

Em conformidade com a ABNT NBR 13818, que regulamenta os revestimentos cerâmicos no Brasil, as amostras seguem uma tendência semelhante à norma internacional, sendo classificadas em diferentes categorias conforme seus comportamentos físicos. Até 1000 °C, a absorção de água entre 14,2% e 18,19% indicam que essas amostras se enquadram no Grupo III, adequado para revestimentos cerâmicos mais porosos, com resistência à flexão ainda satisfatória para aplicações de menor exigência mecânica. No entanto, quando submetidas a temperaturas de 1100 °C ou superiores, com absorção de água abaixo de 3%, as amostras atingem os critérios para porcelanatos, material amplamente utilizado em revestimentos de alta durabilidade, devido à sua baixa porosidade e elevada resistência mecânica.

De acordo com a norma ABNT NBR 15270, que estabelece os requisitos para blocos e telhas cerâmicas, as amostras de argila analisadas apresentam características compatíveis com a fabricação desses produtos até a temperatura de 1000 °C. A absorção de água, variando entre 14,2% e 18,19%, está dentro da faixa exigida pela norma, que permite entre 8% e 22% para blocos cerâmicos e entre 12% e 20% para telhas. A resistência à flexão, que atinge até 22,66 MPa, também se mostra adequada para essas aplicações, garantindo que as peças resultantes tenham a resistência necessária para uso estrutural e em coberturas. Esses resultados indicam que a argila analisada é tecnicamente viável para a produção de cerâmica vermelha dentro desses parâmetros.

As imagens de MEV das superfícies dos corpos de prova, apresentadas na Figura 34, mostram uma sequência típica de densificação com aumento de temperatura.

Figura 34 – Análise de microestrutura (MEV) da superfície dos corpos prova queimados em várias temperaturas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na amostra tratada a 850 °C, observa-se uma elevada porosidade, com poros de tamanhos variados e uma morfologia granular, característica de uma etapa inicial de sinterização, o que corrobora com os altos valores de absorção de água medidos nesta temperatura. Esse comportamento é atribuído ao baixo percentual de agentes fundentes (CaO, Na₂O, K₂O e MgO), que favorece uma densificação mais lenta, já que a formação de uma fase vítrea ocorre apenas em temperaturas mais elevadas (EL BOUKILI *et al.*, 2021). Assim, a argila de Umbuzeiro necessita de temperaturas de queima mais altas para alcançar uma sinterização completa no estado de sólido.

À medida que a temperatura aumenta para 1100 °C, verifica-se uma significativa redução da porosidade, com a fusão parcial dos grãos e uma estrutura mais densa, o que explica a diminuição da absorção de água e o aumento da resistência mecânica. Na amostra submetida a 1200 °C, a sinterização está mais avançada, resultando em uma morfologia compacta e praticamente isenta de poros, indicando um material altamente denso e adequado para revestimentos cerâmicos de alto desempenho, como porcelanatos, devido à baixa absorção de água e elevada resistência à flexão.

4.4 Conclusões

A argila de Umbuzeiro apresentou características mineralógicas e químicas que a tornam uma matéria-prima promissora para aplicações tanto em cerâmica vermelha quanto em revestimentos cerâmicos de alto desempenho. A análise de difração de raios - X revelou a predominância de quartzo, caulinita, muscovita e microclínio nas amostras naturais, com a formação de fases como metacaulinita, mulita e cristobalita após o tratamento térmico. Essas

transformações mineralógicas ocorreram progressivamente com o aumento da temperatura, especialmente entre 950 °C e 1200 °C, onde a sinterização foi intensificada, resultando em uma microestrutura mais densa e compacta.

A argila apresentou plasticidade moderada, cor de queima clara (até 1000 °C) e extrudabilidade aceitável conforme prognóstico de extrusão pela tabela de trabalhabilidade de Bain e Highly.

Os ensaios térmicos revelaram que, a partir de 1000 °C, a densificação da argila é significativa, com redução acentuada na absorção de água e aumento da retração linear. A temperaturas superiores a 1100 °C, a argila atingiu uma baixa absorção de água (<3%) e alta resistência mecânica, características que são classificadas como adequadas para a fabricação de porcelanatos, conforme as normas ISO 13006 e ABNT NBR 13818. Por outro Além disso, as amostras tratadas a temperaturas entre 850 °C e 1000 °C apresentaram propriedades compatíveis com cerâmica vermelha, incluindo blocos e telhas, atendendo aos requisitos da norma ABNT NBR 15270.

A coloração da argila após a queima apresentou variação significativa em função da temperatura. Até 1000 °C, a argila manteve uma coloração clara, enquanto a partir de 1100 °C a coloração tornou-se vermelha. Essa mudança está associada à transformação mineralógica e à presença de óxidos de ferro, que influenciam a coloração e as propriedades da argila em temperaturas mais elevadas. Além disso, observou-se que as propriedades físico-mecânicas da argila melhoraram substancialmente acima de 1100 °C, tornando-a mais adequada para aplicações em revestimentos cerâmicos, devido ao aumento da resistência e à redução da porosidade.

Considerando os parâmetros avaliados, conclui-se que a argila de Umbuzeiro apresenta-se como uma matéria-prima promissora para a indústria da construção civil, sendo adequada para a fabricação de revestimentos cerâmicos e produtos de cerâmica vermelha em seu estado natural. Os resultados obtidos abrem perspectivas para novas investigações, visando aprimorar as propriedades térmicas e mecânicas desta argila, por meio de testes em escala semi-industrial e avaliação de sua aplicação como matéria-prima na indústria local.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFC pelo apoio e suporte financeiro para realização das atividades de campo. Ao Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) pela realização de análises; Ao grupo de

pesquisa AEEP do IFBA pelo apoio e suporte técnico. Aos Laboratórios de Degradação e Estabilização e Compostos (LabDEC) e de Ensaio Mecânicos da Universidade de Brasília (UnB) pelo suporte no desenvolvimento nos ensaios tecnológicos.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13818**: Placas cerâmicas para revestimento: especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270**: Componentes cerâmicos: blocos e telhas cerâmicos para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos: Requisitos para blocos e telhas cerâmicos para alvenaria. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15310**: Placas cerâmicas - Determinação da resistência ao risco. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10545-1**: Placas cerâmicas - Parte 1: Amostragem e base para aceitação. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2017.
- ACEVEDO, Nancy Isabel Álvarez; ROCHA, Marisa; BERTOLINO, Luiz Carlos. Mineralogical characterization of natural clays from Brazilian Southeast region for industrial applications. *Cerâmica*, v. 63, n. 366, p. 253-262, 2017. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/317133042>. Acesso em: 26 ago. 2024.
- AMORIM, Luciana Vieira *et al.* Bentotites from Boa Vista, Brazil: physical mineralogical and rheological properties. *Materials Research*, v. 7, n. 4, p. 583-593, 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/250029724>. Acesso em: 26 ago. 2024.
- BAIN, John Alexander; HIGHLEY, David Ernest. Kaolin: Genesis and utilization. *Mineralogical Society of London*, Special Publication, n. 12, p. 165-176, 1978.
- BARSOUM, Michel. **Fundamentals of ceramics**. CRC Press, 2019.
- BRINDLEY, George William; BROWN, Gordon. **Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification**. Mineralogical Society, 1980.

BRITO, Igor *et al.* Avaliação de novos depósitos de argilas do Estado da Paraíba visando sua aplicação como matérias-primas cerâmicas. **Cerâmica**, v. 61, n. 360, p. 391-398, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613601926>. Acesso em: 26 ago. 2024.

CIELAB - Commission International de Eclairage (CIE). Recommendations on uniform color spaces, color difference equations, psychometric color terms. Supplement 2 to CIE publication 15. **Colorimetry Bureau Central de la CIE**, Paris, 1976.

DARWEESH, Hassan. Building materials from siliceous clay and low grade dolomite rocks. **Ceramics International**, v. 27, n. 1, p. 45-50, 2001. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00040-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00040-7). Acesso em: 26 ago. 2024.

ELBOUKILI, Ghita *et al.* Mineralogical, physico-chemical and technological characterization of clay from Bensmim (Morocco): Suitability for building application. **Construction and Building Materials**, v. 280, n. 5, p. 122300, 2021.

HAYASHI, Shigeo; TAKANO, Masahide; KIKKAWA, Shigeharu. Magnetic and electrical properties of pyrochlore-type RE₂Ti₂O₇ (RE=rare earth) single crystals. **American Mineralogist**, v. 84, n. 10, p. 1635-1642, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10545-4**: Ceramic tiles – Part 4: Determination of modulus of rupture and breaking strength. Geneva: ISO, 2020.

INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13006**: Ceramic tiles – Definitions, classification, characteristics and marking. Geneva: ISO, 2018.

JUNIOR, Luiz *et al.* Influência das propriedades mineralógicas nas características tecnológicas de cerâmicas. **Cerâmica**, v. 58, n. 348, pág. 404-412, 2012.

KUMARI, Niharika; MOHAN, Chandrashekhar. Basics of clay minerals and their characteristic properties. **Clay Clay Miner**, v. 24, n. 1, 2021.

LUZ, Adão Benvindo; LINS, Fernando Antônio Freitas. **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. CETEM/MCT, 2005. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/522>. Acesso em: 26 ago. 2024.

MACEDO, Ronaldo *et al.* Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 54, p. 411-417, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-9132008000400005>. Acesso em: 26 ago. 2024.

MAIA, Luiz *et al.* Caracterização Térmica de argilas da cidade de Costa Rica no Estado de Mato Grosso do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 44., 2000, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABCERAM, 2000. p. 06101-06110.

MANOHARAN, Chellasamy *et al.* Analysis of temperature effect on ceramic brick production from alluvial deposits, Tamilnadu, India. **Applied Clay Science**, v. 54, n. 1, p. 20-25, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2011.07.002>. Acesso em: 22 ago. 2024.

MENSHAZ, Abdullah; JOHARI, Megat; AHMAD, Zainal. Characterization of metakaolin treated at different calcination temperatures. **AIP Conference Proceeding**, v. 1892, n. 1, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5005659>. Acesso em: 26 ago. 2024.

MONTEIRO, Sergio; VIEIRA, Carlos. Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil. **Applied Clay Science**, v. 27, n. 3-4, p. 229-234, 2004.

MORENO, Márcia *et al.* Caracterização de argilas e composição de massas cerâmicas preparadas com base na análise de curvas de consistência de misturas argila-água. **Cerâmica**, v. 62, n. 361, p. 21-31, 2016.

REED, James. **Principles of ceramics processing**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.

SANTOS, Pêrsio de Souza. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1989.

SANTOS, Samara *et al.* Estudo cinético do processo de desidroxilação da caulinita. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 57., 2013, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: ABCERAM, 2013. p. 1775-1787.

SCHACKOW, Adilson; CORREIA, Sivaldo; EFFTING, Carmene. Influence of microstructural and morphological properties of raw natural clays on the reactivity of clay brick wastes in a cementitious blend matrix. **Cerâmica**, v. 66, p. 154-163, 2020.

SCHNEIDER, Hans; SCHREUER, Jörg; HILDMANN, Bernhard. Structure and properties of mullite - A review. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 28, n. 2, p. 329-344, 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/223890648>. Acesso em: 26 ago. 2024.

SETZ, Luiz; DA SILVA, Antônio. **O processamento cerâmico sem mistério**. São Paulo: Editora Blucher, 2019.

SOUSA, Sidnei; HOLANDA, José. Sintering behavior of porous wall tile bodies during fast single-firing process. **Materials Research**, v. 8, p. 197-200, 2005.

XU, Ruian *et al.* **Chemistry of zeolites and related porous materials: synthesis and structure**. Chichester: John Wiley & Sons (Asia) Pte. Ltd., 2007. ISBN 978-0-470-82233-3. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281721463>. Acesso em: 26 ago. 2024.

YIN, Qingrui; ZHU, Binghe; ZENG, Huarong. **Microstructure, property and processing of functional ceramics**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.

5 RESÍDUO DA EXTRAÇÃO DE ESMERALDAS: ANÁLISE MINERALÓGICA E POTENCIAL TECNOLÓGICO EM APLICAÇÕES NA COMPOSIÇÃO DE MASSAS CERÂMICAS

RESUMO

A exploração de esmeraldas nas Serras da Carnaíba e de Campo Formoso, na Bahia, gera significativos resíduos ambientais. Este estudo teve como objetivo caracterizar os resíduos dos garimpos de Carnaíba (Pindobaçu-BA) e Socotó (Campo Formoso-BA) e desenvolver compósitos com argila para a produção de materiais cerâmicos na construção civil. Foram elaboradas formulações com concentrações de argila e resíduos minerais variando entre 10, 20, 30, 40 e 50 %, as quais foram submetidas a análises químicas e mineralógicas por meio de fluorescência e difração de raios - X. As amostras foram sinterizadas em diferentes temperaturas (850, 900, 950, 1000, 1100 e 1200 °C) e submetidas a ensaios tecnológicos (absorção de água, porosidade aparente, retração linear e resistência à flexão). Os resultados revelaram características favoráveis para a indústria cerâmica, com a presença predominante de SiO₂ e Al₂O₃ afetando a plasticidade, e elementos fundentes influenciando as propriedades térmicas. A diversidade mineralógica, incluindo mulita, metacaulinita, indialita e quartzo, contribuiu para a resistência e estabilidade dos compósitos. As formulações C₂₀ (20 % de resíduo de Carnaíba) e S₁₀ (10 % de resíduo de Socotó) apresentaram os melhores resultados, destacando-se pela viabilidade técnica e sustentabilidade na produção cerâmica.

Palavras-chave: reutilização mineral; sustentabilidade; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Emerald mining in the Carnaíba and Campo Formoso Mountains, in Bahia, generates significant environmental waste. This study aimed to characterize the waste from the Carnaíba (Pindobaçu-BA) and Socotó (Campo Formoso-BA) mining sites and to develop clay-based composites for the production of ceramic materials in civil construction. Formulations were prepared with varying concentrations of clay and mineral residues (10, 20, 30, 40, and 50 %) and were subjected to chemical and mineralogical analyses using X-ray fluorescence and

diffraction. The samples were sintered at different temperatures (850, 900, 950, 1000, 1100, and 1200 °C) and underwent technological tests (water absorption, apparent porosity, linear shrinkage and flexural strength). The results revealed favorable characteristics for the ceramic industry, with the predominant presence of SiO₂ and Al₂O₃ affecting plasticity, and fluxing elements influencing thermal properties. The mineralogical diversity, including mullite, metakaolinite, indialite and quartz, contributed to the composites' strength and stability. The C₂₀ (20 % Carnaíba residue) and S₁₀ (10 % Socotó residue) formulations showed the best results, standing out for their technical feasibility and sustainability in ceramic production.

Keywords: mineral reuse; sustainability; mechanical properties.

5.1 Introdução

É amplamente reconhecido que o setor da construção civil exerce um impacto considerável no consumo de recursos naturais nos dias atuais. Nesse contexto, torna-se evidente a importância do avanço de materiais alternativos destinados a esse segmento, visando a redução de custos, minimização dos impactos ambientais e a incorporação de resíduos sólidos. Em meio a esse cenário, a pesquisa de Silveira (2015) destaca a relevância da utilização de resíduos provenientes da atividade mineradora, devido ao expressivo volume de produção e à considerável quantidade de resíduos gerados ao longo de todas as etapas do processo produtivo dessa indústria.

A atividade de exploração de esmeraldas na região nordeste do estado da Bahia, especialmente nas Serras da Carnaíba e Campo Formoso, resulta na produção de volumes substanciais de resíduo de esmeralda. Os principais constituintes minerais presentes nesses resíduos incluem as micas (flogopita, biotita), quartzo e molibdenita. Uma tendência observada nos últimos anos é o crescente interesse na utilização desses resíduos minerais como aditivos na fabricação de materiais cerâmicos, visando aprimorar a qualidade dos produtos e ampliar suas possíveis aplicações.

Ciente de que a extração e beneficiamento de esmeraldas nos garimpos da Serra da Carnaíba e de Socotó ocasionam diversos impactos socioambientais, ressalta-se a exploração desordenada dessas áreas, carecendo de estudos prévios e técnicas especializadas, conforme indicado por Cavalcante (2010). Entre esses impactos, destaca-se o acúmulo indiscriminado de resíduos, despejados de maneira aleatória no ambiente.

Neste estudo, propomos uma análise aprofundada da viabilidade técnica de integrar resíduos resultantes da exploração desordenada de esmeraldas nos garimpos de Carnaíba (localizado no município de Pindobaçu – BA) e de Socotó (município de Campo Formoso – BA) na fabricação de materiais cerâmicos. Nosso enfoque será direcionado à formulação de compostos cerâmicos que englobam uma ampla faixa de índices de resíduo de esmeraldas, variando desde modestos 10 % até ousados 50 %. Este estudo busca não apenas avaliar a viabilidade técnica, mas também inspirar e realçar o potencial transformador da incorporação desses resíduos na indústria cerâmica, promovendo, assim, uma abordagem mais sustentável e inovadora.

5.2 Materiais e Métodos

Neste estudo, foram preparadas dez formulações cerâmicas com até 50 % em peso de resíduo de extração da esmeralda, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Composição e nomenclaturas das formulações.

Formulações	Composições	
	Argila (%)	Resíduo (%)
A	100	0
C	0	100
C ₁₀	90	10
C ₂₀	80	20
C ₃₀	70	30
C ₄₀	60	40
C ₅₀	50	50
S	0	100
S ₁₀	90	10
S ₂₀	80	20
S ₃₀	70	30
S ₄₀	60	40
S ₅₀	50	50

Fonte: Elaborado pela autora. A: Argila. C: Resíduo Garimpo Carnaíba. S: Resíduo Garimpo Socotó.

No preparo das massas cerâmicas, foi usada a argila adquirida no depósito localizado no Distrito de Umbuzeiro-BA e os resíduos provenientes dos garimpos de Carnaíba e Socotó. As amostras de argila e dos resíduos foram secas em estufa a 110 °C por 24 horas, depois foram fragmentados, moídos e peneirados com malha de 74 µm (peneira ABNT 200).

Com o intuito de obter corpos de prova para a analisar as propriedades cerâmicas, as misturas das formulações, apresentadas na Tabela 3, foram homogeneizadas em moinho de bolas durante 15 minutos e, em seguida, umedecidas com 10 % de água destilada para aquisição de plasticidade; favorecendo a etapa seguinte de compactação dos corpos de prova.

A conformação dos corpos de prova foi realizada em matriz metálica (60 mm x 20 mm x 6 mm) utilizando prensa hidráulica Bonevau (15 toneladas) à pressão de 5 MPa. Após a conformação, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa elétrica a 110 °C por um período de 24 horas, visando à completa remoção da umidade residual.

Com as matérias-primas moídas e adequadamente homogeneizadas tomaram-se alíquotas para a realização de análise química e mineralógica. As análises químicas e mineralógicas foram realizadas por fluorescência e difração de raios - X, utilizando espectrômetro WDS Bruker S8 Tiger e difratômetro Bruker D8 Discover, respectivamente.

Os processos térmicos foram realizados em forno mufla Quimis, com ciclo térmico de isoterma de 1 hora nas temperaturas de 850, 900, 950, 1000, 1100 e 1200 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min. Após a etapa isotérmica, o forno foi desligado e os corpos de prova foram submetidos a um resfriamento natural no interior do forno até atingirem a temperatura ambiente. As temperaturas de queima foram definidas com base na temperatura de início de fusão da argila.

Com os corpos de prova produzidos foram determinadas as propriedades tecnológicas, tais como absorção de água, porosidade aparente, retração linear e resistência à flexão.

As características químicas e mineralógicas pós-queima foram reavaliadas por fluorescência e difração de raios - X.

5.3 Resultados e Discussões

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise química das matérias-primas. Na análise da argila (A), o óxido de silício (SiO_2) apresenta o maior percentual dentre os elementos, seguido pelos óxidos de alumínio (Al_2O_3) e de ferro (Fe_2O_3). Esses resultados indicam o potencial dessa argila para a produção de materiais cerâmicos de alta qualidade (PRADO, 2011; VIEIRA *et al.*, 2007). Também se detecta a presença de óxidos fundentes (K_2O , Na_2O , CaO e MgO) em concentrações baixas, cuja soma totaliza 2,15 %

Tabela 4 – Composição química das matérias-primas estudadas.

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MoO ₃ *	LOI	Total
Amostras	% em peso												
A	54,29	28,34	4,35	0,63	<LQ	0,50	<LQ	0,36	1,29	<LQ	<LQ	10,86	100,62
C	34,98	11,65	4,28	0,17	0,11	11,99	13,62	0,16	3,87	9,93	6,40	3,64	100,80
S	47,09	9,71	8,70	0,22	0,14	23,59	2,24	0,25	4,82	<LQ	<LQ	4,12	100,89

Fonte: Elaborado pela autora. (<LQ) = Abaixo do limite quantificável. (*) = Resultado semiquantitativo.

A: Argila. C: Resíduo do Garimpo de Carnaíba. S: Resíduo do Garimpo de Socotó.

Na argila analisada, observou-se uma perda ao fogo (LOI) de 10,86 %, que está diretamente relacionada à desidroxilação dos minerais de argila presentes na amostra. Essa perda ao fogo refere-se principalmente à quantidade de água que é liberada durante o processo de queima, resultante da desestruturação dos grupos hidroxila (-OH) nos argilominerais, como a caulinita (MORENO *et al.*, 2016). Esses grupos -OH, ao serem aquecidos, se descompõem e liberam água na forma de vapor, o que contribui para a redução da massa da amostra e reflete a composição mineralógica e a estabilidade térmica da argila.

Nas amostras dos resíduos dos garimpos de Carnaíba (C) e de Socotó (S) verifica-se a predominância dos óxidos de silício (SiO₂) e alumínio (Al₂O₃). Contudo, as concentrações de óxidos fundentes são mais elevadas nessas matérias-primas, alcançando 29,64 % na amostra C e 30,90 % na amostra S.

A quantidade de óxidos fundentes presentes nas matérias-primas foi maior na amostra S, sendo estes importantes para o processo de síntese do mineral mulita (3Al₂O₃.2SiO₂), pois irão favorecer o processo de difusão devido a formação da fase líquida.

O material que possui maior relação alumina/sílica é a amostra S (4,85), sendo a amostra de argila (A) a que teve menor relação (2,09). Este é inclusive, um parâmetro significativo para o processo de obtenção da mulita (3Al₂O₃.2SiO₂).

A presença significativa de Fe₂O₃ nas amostras estudadas é um fator determinante para a coloração avermelhada observada nas amostras após o processo de queima. A matéria-prima com maior quantidade de óxido de ferro é a amostra S (8,70 %), e o material com menor percentual desse óxido é encontrado na amostra C (4,28 %). Os óxidos de ferro (Fe₂O₃) e titânio (TiO₂) estão frequentemente associados à coloração da cerâmica vermelha após a queima (PRADO, 2011).

Na amostra C, que incorpora resíduo proveniente do garimpo de Carnaíba, destaca-se a presença significativa de óxido de fósforo (P₂O₅), aproximadamente 9,93 %, e de óxido de molibdênio (MoO₃), em torno de 6,4 %. Em altas temperaturas de queima, o P₂O₅,

em combinação com a sílica (SiO_2), podem atuar como fundente e opacificante, funcionando como formador de vidro (IRVINE; MURPHY, 2018; KANG, 2004; SCHROEDER; KALIDINDI, 2023; SOKHANVAR; SADEGHI, 2020).

O óxido de molibdênio, por outro lado, é descrito na literatura como um agente redutor em massas cerâmicas, e não como fundente ou estabilizador (BURCH, 1978; KUMAR; PATEL, 2022). Durante o processo de queima, o MoO_3 pode reagir com outros óxidos, promovendo a redução das peças cerâmicas, podendo influenciar na formação de fases minerais específicas, como evidenciado nas análises de difração de raios - X.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados das análises de enxofre e carbono elementares das matérias-primas utilizadas na composição da massa cerâmica, destacando suas médias, desvios padrão e variações percentuais relativas (%RSD).

Tabela 5 – Análises de enxofre e carbono elementares das matérias-primas.

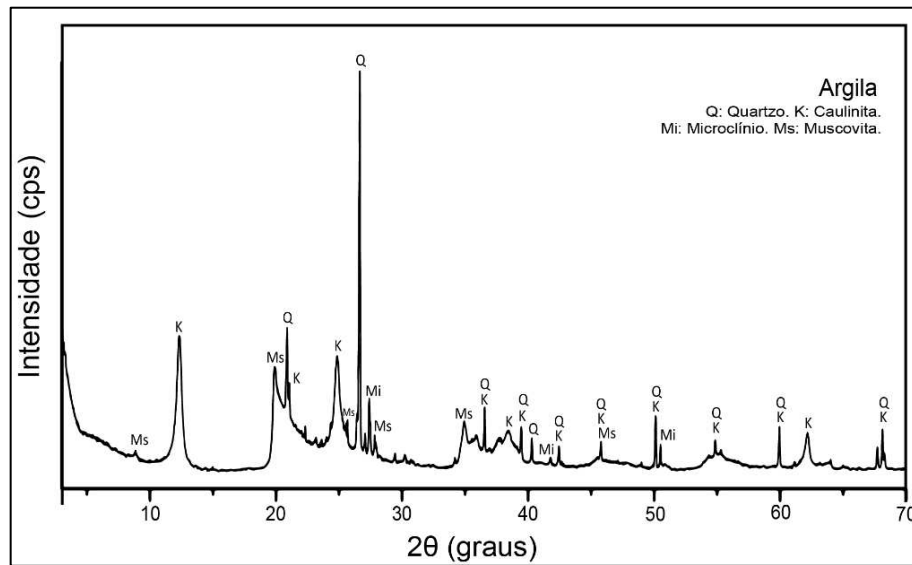
Amostras	Enxofre (M)	Enxofre (DP)	Enxofre (% RSD)	Carbono (M)	Carbono (DP)	Carbono (%RSD)
A	0,02%	0,01%	22,3	0,72%	0,00%	0,115
C	3,82%	0,16%	4,26	0,14%	0,00%	1,75
S	0,02%	0,02%	127	0,31%	0,00%	0,985

Fonte: Elaborado pela autora. **M**: Média. **DP**: Desvio Padrão. **%RSD**: Desvio Padrão Relativo.

As análises de enxofre e carbono das matérias-primas revelam variações significativas entre os materiais. O resíduo de Carnaíba apresentou o maior teor de enxofre (3,82 %) com baixa variabilidade (%RSD de 4,26), enquanto o resíduo de Socotó e a argila apresentaram concentrações muito baixas de enxofre (0,02 %), com o resíduo de Socotó mostrando maior variabilidade (%RSD de 127). Em relação ao carbono, a argila exibiu o maior teor (0,72 %), seguida pelo resíduo de Socotó (0,31 %) e o de Carnaíba (0,14 %), todos com baixa variabilidade, conforme indicado pelos baixos valores de %RSD. Esses resultados fornecem uma visão precisa da composição elementar das amostras.

Na análise mineralógica da argila, apresentada na Figura 35, é notável a predominância de quartzo (SiO_2) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), com a presença também de microclínio (KAlSi_3O_8) e muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$).

Figura 35 - Difratomogramas de raios - X da argila.

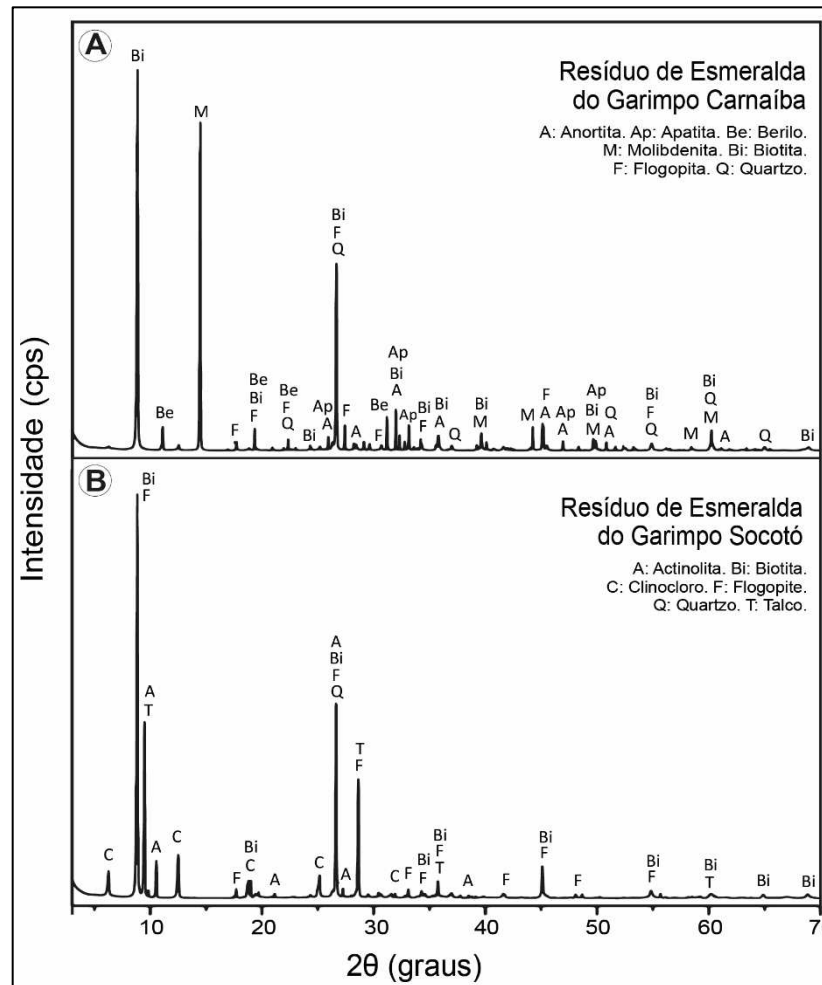


Fonte: Elaborado pela autora.

No difratograma, foi observada a presença de sílica (SiO_2) juntamente com as fases minerais quartzo, caulinita, microclínio e a muscovita, o que está de acordo com os resultados da análise química, que computam o silício proveniente dessas fases. O microclínio é identificado como um silicato de potássio e alumínio, elementos detectados na análise por fluorescência de raios - X. A caulinita é reconhecida pela sua estrutura lamelar, composta por camadas alternadas de octaedros de alumínio e tetraedros de sílica. Já a muscovita está relacionada ao espaçamento entre suas camadas de silicato. A presença dessas fases minerais é fundamental para confirmar a composição mineralógica da argila destinada ao uso cerâmico, em correlação com os dados obtidos por meio de análises químicas e térmicas (ACEVEDO *et al.*, 2017; MACEDO *et al.*, 2008; SANTOS, 1989).

Os difratogramas apresentados na Figura 36, revelam a composição mineralógica das amostras dos resíduos de esmeralda dos garimpos de Carnaíba e Socotó.

Figura 36 - Difratomogramas de raios - X dos resíduos da exploração de esmeralda. A) Garimpo Carnaíba; e B) Garimpo Socotó.



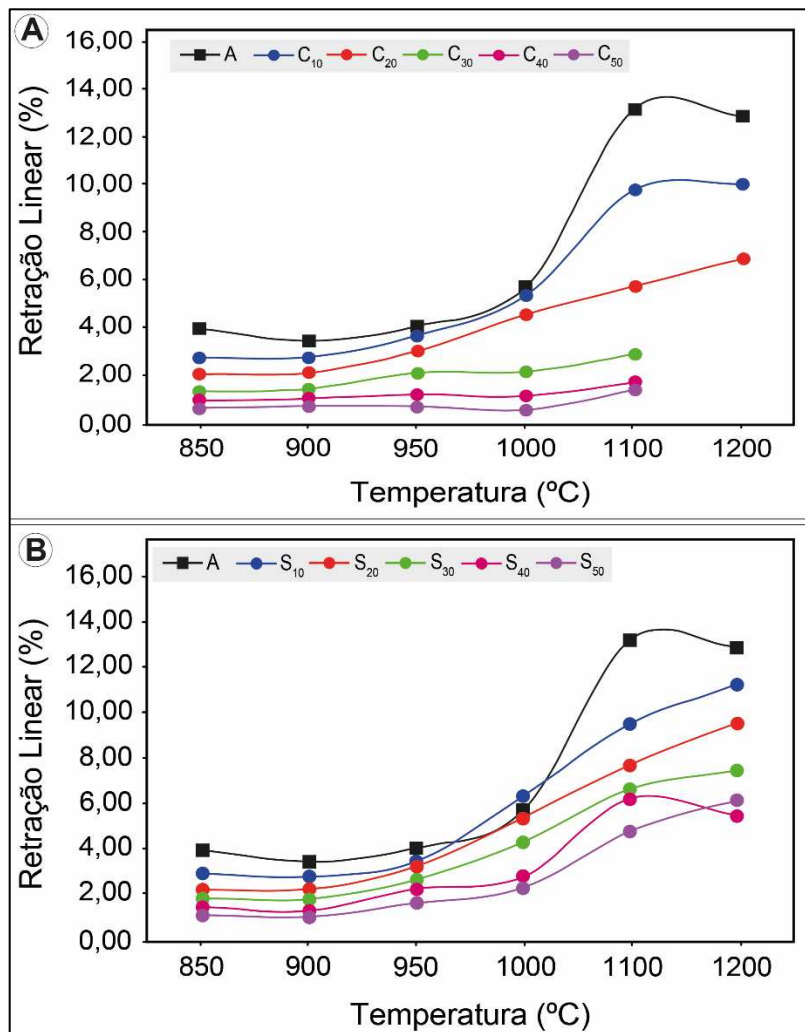
Fonte: Elaborado pela autora.

Os elevados teores de ferro encontrados na composição química dessas amostras estão associados à presença do mineral biotita ($K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH,F)_2$). A flogopita, cuja composição química é descrita como $(KMg_3(AlSi_3O_{10})(F,OH)_2)$, também é identificada em múltiplas fases dos difratogramas analisados. Na amostra contendo resíduo mineral do garimpo de Carnaíba destaca-se a presença significativa do mineral molibdenita (MoS_2), o que está em conformidade com os altos teores de óxido de molibdênio (MoO_3) determinados para essa amostra. Observamos também a presença do mineral apatita ($Ca_5(PO_4)_3(F,OH,Cl)$) justificando os elevados teores de fosforo (P_2O_5), presentes nessa amostra. Outros minerais identificados incluem quartzo (SiO_2), anortita ($CaAl_2Si_2O_8$), actinolita ($Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$), berilo ($Be_3Al_2Si_6O_{18}$), talco ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$) e clinocloro ($Mg_5Al(AlSi_3)O_{10}(OH)_8$), todos pertencentes ao grupo dos silicatos. A composição química

desses minerais é consistente com os dados obtidos por fluorescência de raios - X, indicando a presença significativa de cálcio, alumínio, ferro e magnésio. Esses resultados corroboram com os dados apresentados por Vieira *et al.* (2007) em seus estudos sobre a inclusão de resíduos minerais em massa cerâmica.

Na Figura 37 observamos os valores de retração linear dos corpos de prova após a queima a 850, 900, 950, 1000, 1100 e 1200 °C. A análise dos dados revela um aumento progressivo na retração linear com o incremento da temperatura de queima, especialmente acima de 1000 °C, exceto nas formulações C₃₀, C₄₀ e C₅₀, onde ocorreu a fusão das amostras.

Figura 37 - Ensaio de retração linear de queima. A) Formulações com o resíduo do Garimpo de Carnaíba; e B) Formulações com o resíduo do Garimpo de Socotó.



Fonte: Elaborado pela autora.

A fusão das amostras de massa cerâmica com 30 % a 50 % de resíduo mineral de esmeralda a 1200 °C ocorre devido à proximidade dessa temperatura com o ponto de ebulição

do lítio (1300 °C), encontrado em abundância nas rochas do embasamento (COSTA, 2019). A presença de água na estrutura mineral provoca uma redução na temperatura de fusão, uma vez que altera a estrutura cristalina dos materiais. Esse efeito é mais evidente nas amostras com maior teor de resíduo de Carnaíba e com maior conteúdo de umidade, conforme observado nos ensaios de retração linear e absorção de água.

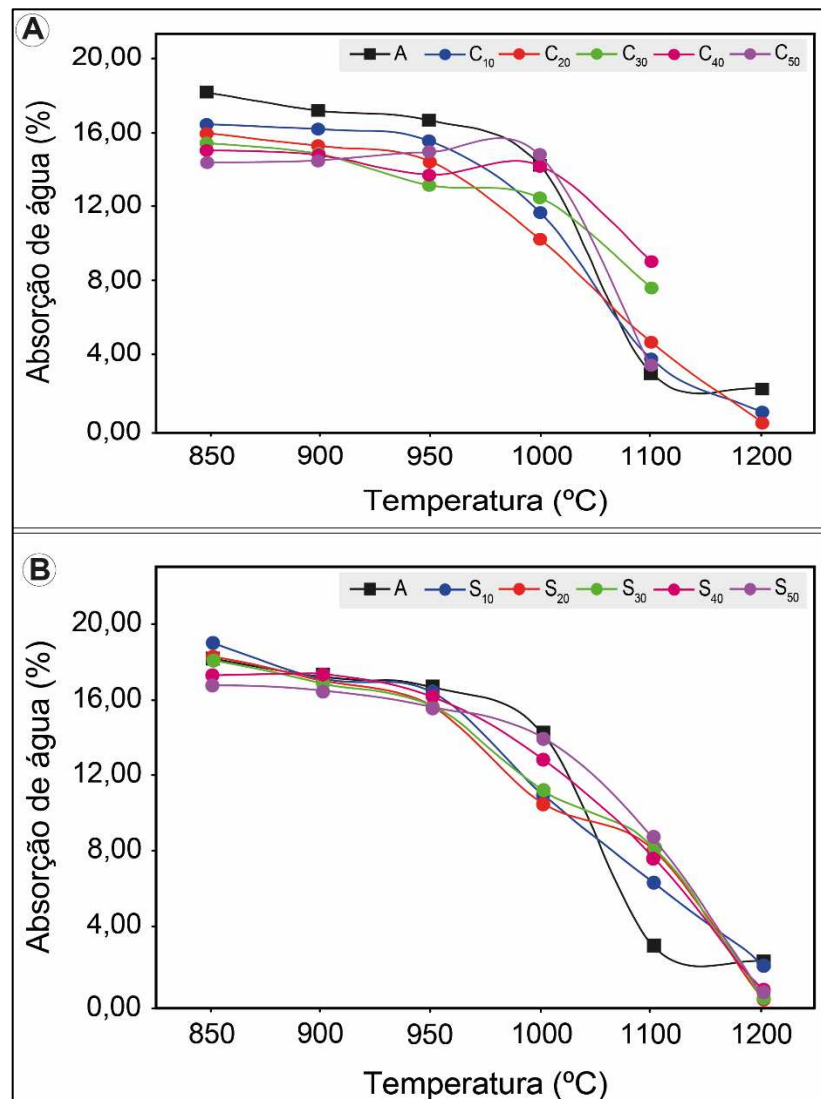
Nas formulações C e S, que apresentam os teores entre 10 % e 20 % de resíduo de esmeralda, foi observada uma redução acentuada na retração a partir de 1100 °C em comparação com a amostra contendo 100 % de argila. Esse comportamento pode ser atribuído ao denso empacotamento das partículas durante a conformação, o que, ao serem aquecidas, favoreceu a formação de uma fase líquida, promovendo a sinterização e resultando em maior retração das peças.

Por outro lado, nas formulações C e S com teores de resíduo de esmeralda superior a 30 %, verificou-se uma leve expansão a partir de 900 °C. Essa expansão é atribuída à presença de minerais do grupo das micas, como a biotita e flogopita, na massa cerâmica. A adição superior a 30 % de resíduo de esmeralda na massa cerâmica aumentou a porcentagem de mica, e, conforme relatado na literatura (MENEZES *et al.*, 2006; MORENO *et al.*, 2016), massas cerâmicas contendo mica e submetidas a temperaturas entre 600 e 900 °C apresentam expansão devido à desidroxilação da mica.

Os resultados das amostras produzidas com a formulação C₂₀ corroboram os dados obtidos por Cavalcante *et al.* (2012), que investigaram a incorporação do resíduo da exploração de esmeraldas em massas cerâmicas para revestimento.

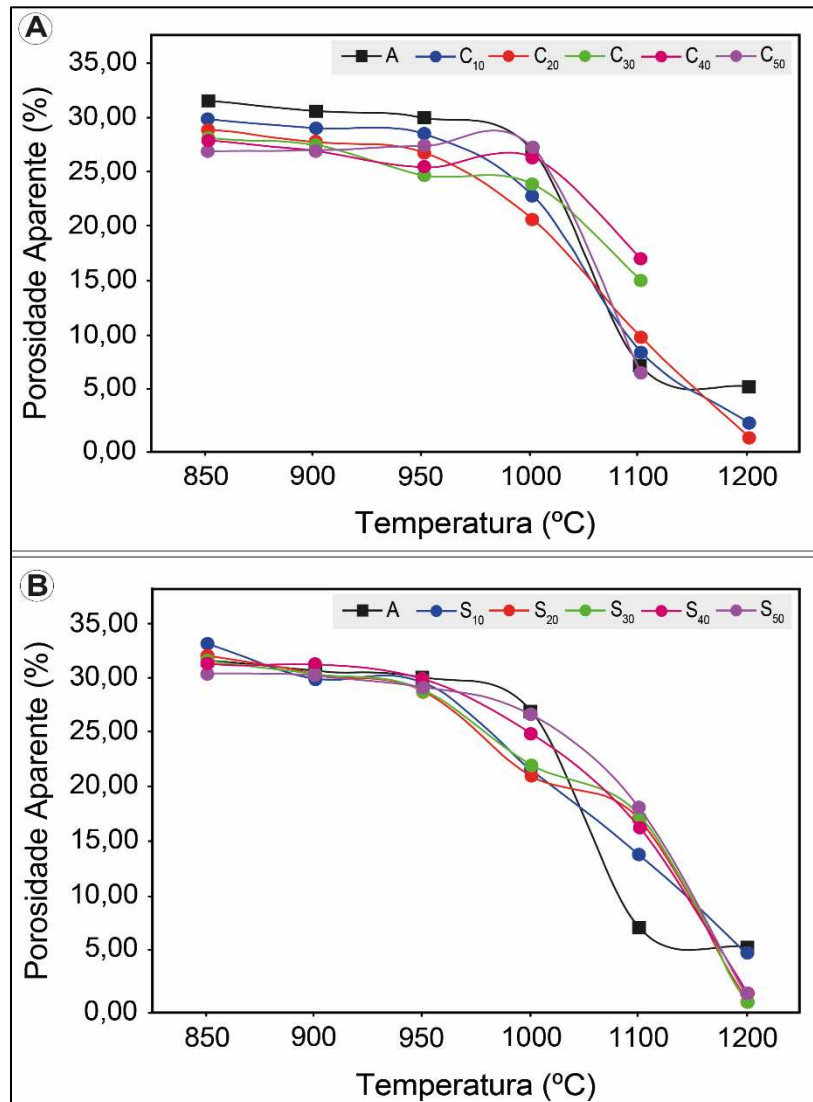
Nas Figuras 38 e 39 verifica-se, respectivamente, os valores de absorção de água e de porosidade aparente tanto na argila quanto nas formulações C e S, esses são consistentes com os resultados dos ensaios de retração linear discutidos anteriormente. Nota-se que com o aumento da temperatura até 1200 °C, todas as formulações demonstraram uma redução na absorção de água e na porosidade aparente, o que pode ser explicado pela presença de óxidos fundentes, como Fe₂O₃ e K₂O, na composição química da argila e das formulações. De acordo com Babisk *et al.* (2012) e Moreno *et al.* (2016), amostras que contêm óxidos de Fe e K, quando expostas a altas temperaturas, passam por fusão e podem preencher os poros vazios presentes nas amostras.

Figura 38 - Ensaio de absorção de água. A) Formulações com o resíduo do Garimpo de Carnaíba; e B) Formulações com o resíduo do Garimpo de Socotó.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 39 - Ensaio de porosidade aparente. A) Formulações com o resíduo do Garimpo de Carnaíba; e B) Formulações com o resíduo do Garimpo de Socotó.



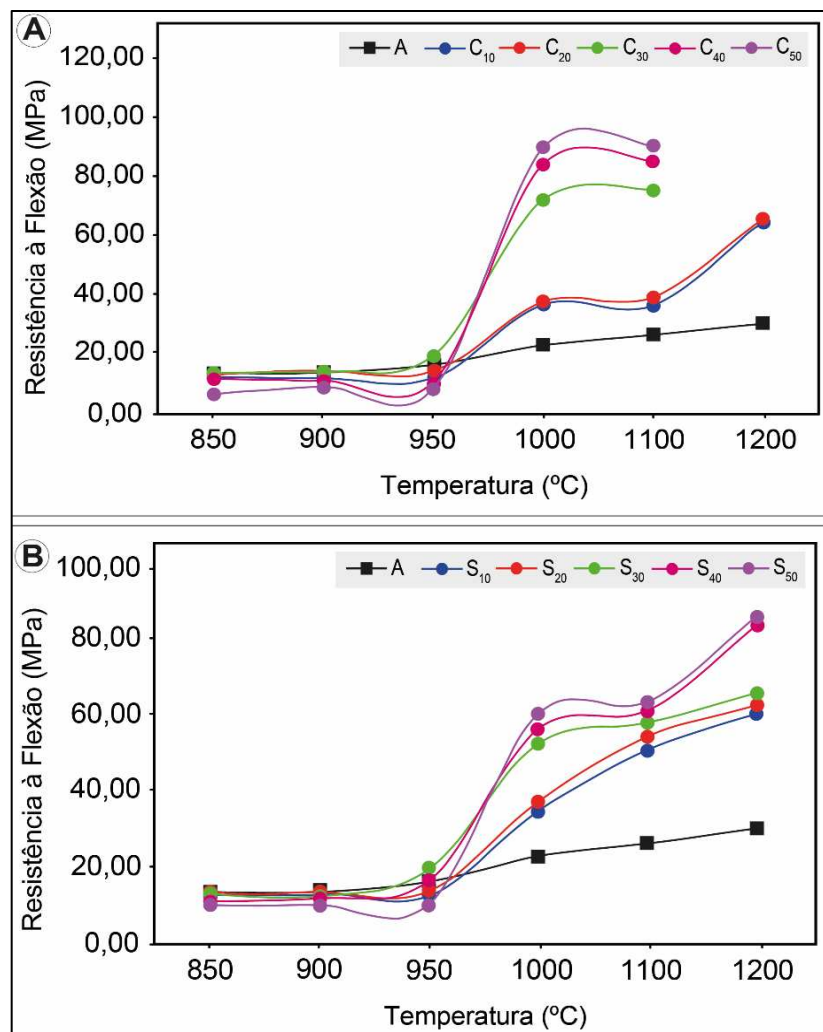
Fonte: Elaborado pela autora.

As reduções mais significativas na absorção de água e na porosidade aparente foram registradas a partir da temperatura de 1100 °C na argila e nas formulações C₁₀, C₂₀ e S₁₀ com teores de resíduos mineral variando de 0 % a 20 %, situando-se entre 2,9 % e 6,3 % para absorção de água e entre 6,59 % a 13,79 % para a porosidade aparente. Enquanto isso, a absorção de água e porosidade aparente mínima a 1200 °C foi observada na formulação C e S com teores de resíduos variando de 10 % a 50 %, oscilando entre 4,82 % e 0 %.

O resultado de resistência à flexão da argila e das formulações estudadas, presentes na Figura 40, mostram que quanto maior a temperatura de queima, maior a resistência. As propriedades mecânicas da peça cerâmica resultam de uma organização mais

densa das partículas, formação de novas fases e maior compactação. Esses fatores aumentam a força de ligação entre as partículas, proporcionando maior resistência ao material.

Figura 40 - Ensaio de resistência à flexão. A) Formulações com o resíduo do Garimpo de Carnaíba; e B) Formulações com o resíduo do Garimpo de Socotó.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para as temperaturas de 850 e 950 °C, as peças cerâmicas obtidas com as formulações contendo resíduo mineral mostram uma menor resistência. A presença do quartzo na argila e nas formulações pode impactar no comportamento das peças cerâmicas durante o resfriamento após o tratamento térmico. Isso ocorre porque o quartzo passa por mudanças em sua estrutura cristalina (transformações estruturais) quando aquecido e resfriado. Essas mudanças podem gerar tensões internas no material, resultando em trincas.

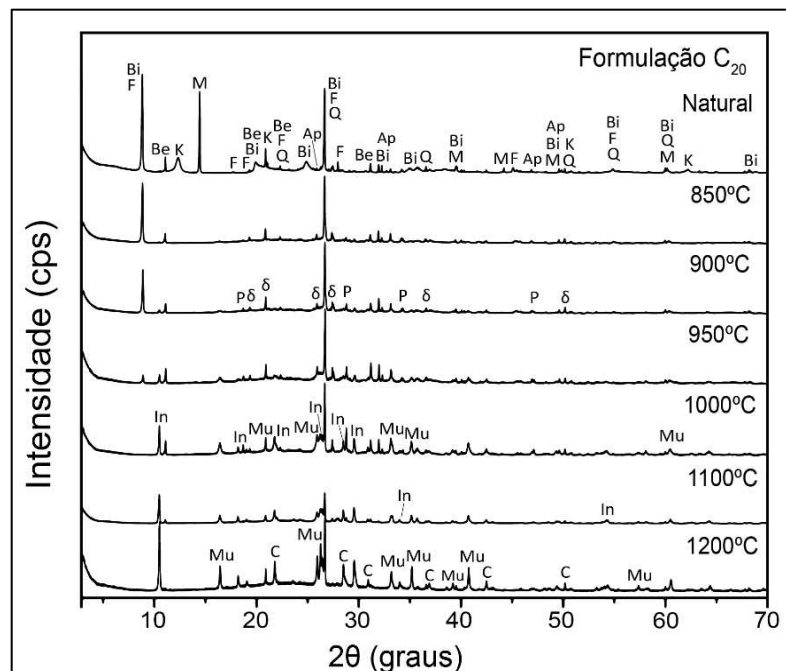
As trincas, por sua vez, concentram essas tensões, o que pode comprometer a integridade e a resistência do material final, o que pode estar associado à dilatação térmica linear do quartzo.

Ao analisar a temperatura de 1000 °C, observou-se um aumento significativo na resistência em todos os corpos de prova, com destaque para as formulações que contêm resíduo. Entretanto, a 1100 °C, houve uma tendência de diminuição da resistência apenas nas formulações C e S, seguida por um novo aumento da resistência a 1200 °C.

Dentre as formulações analisadas nesse estudo, as formulações C₂₀ e S₁₀ destacaram-se por apresentar resultados mais apropriados e equilibrados. Essas formulações foram caracterizadas com base na evolução térmica da composição mineralógica, na análise da gresificação e nos resultados de resistência à flexão obtidos. A combinação desses fatores demonstra a eficácia das formulações em termos de desempenho mecânico e estabilidade térmica, tornando-as as mais adequadas para o estudo.

Observa-se no difratograma da Figura 41, para a formulação C₂₀ (natural/sem queima), a presença das seguintes fases minerais: molibdenita (MoS₂), caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄), flogopita (KMg₃(AlSi₃O₁₀)(F,OH)₂), biotita (K(Mg,Fe)₃(AlSi₃O₁₀)(OH,F)₂), quartzo (SiO₂), apatita ((Ca₅(PO₄)₃(F,OH,Cl)) e berilo (Be₃Al₂Si₆O₁₈).

Figura 41 – Difratograma de raios - X da formulação C₂₀, antes e após a queima. Fases cristalinas identificadas = Q: Quartzo. M: Molibdenita. K: Caulinita. Mu: Mulita. Bi: Biotita. F: Flogopita. Be: Berilo. δ: Metacaulinita. P: Powelita. In: Indialita. C: Cristobalita. Ap: Apatita.



Fonte: Elaborado pela autora.

A evolução térmica da formulação C₂₀, revela que, à medida que a temperatura aumenta, ocorrem transformações significativas nas fases minerais. Entre 850 e 900 °C, a molibdenita começa a oxidar, formando trióxido de molibdênio (MoO₃), enquanto a caulinita desidroxila para formar metacaulinita (Al₂Si₂O₇). A formação de powellita (CaMoO₄) a 900 °C indica que as condições de temperatura são suficientes para iniciar a reação entre os componentes presentes na amostra, especificamente o trióxido de molibdênio (MoO₃), proveniente da oxidação da molibdenita (MoS₂), e o cálcio, possivelmente oriundo da anortita (CaAl₂Si₂O₈) presente no resíduo do garimpo de carnaúba.

Conforme relatado por Cavalcante *et al.* (2012), a anortita não foi detectada nas formulações analisadas em seu estudo, um resultado que se repete na presente pesquisa, mesmo nas formulações com 50 % de resíduo. Esse resultado reforça os dados obtidos por Cavalcante *et al.* (2012), indicando que durante o processo de queima ocorreram reações entre o resíduo de esmeralda e a argila, principais componentes das formulações cerâmicas investigadas.

Entre 950 e 1000 °C a oxidação da molibdenita continua, e a metacaulinita começa a transformar-se em mulita (3Al₂O₃·2SiO₂). As micas (flogopita e biotita) formam possíveis fases adicionais, como enstatita e outros piroxênios. A powellita permanece estável, mas pode começar a se decompor em temperaturas mais altas.

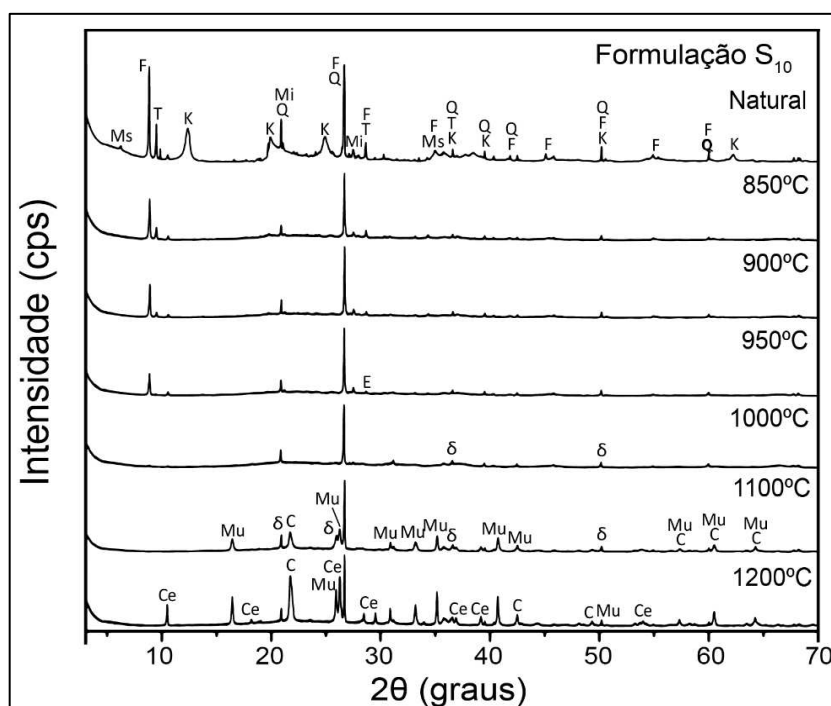
Na faixa de 1000 a 1100 °C, a formação de mulita a partir de caulinita se intensifica e o quartzo inicia sua transformação para cristobalita.

Entre 1100 e 1200 °C a mulita torna-se mais estável, enquanto a sílica amorfa pode formar-se a partir de resíduos da caulinita. O berilo, ao se decompor, contribui com BeO e Al₂O₃ para a formação de fases complexas, podendo influenciar a formação de mulita. Indialita (a forma hexagonal de cordierita) pode se formar a partir das fases ricas em magnésio, alumínio e sílica em temperaturas superiores a 1100 °C. A cristobalita permanece presente como uma das fases de alta temperatura do quartzo. Essas transformações indicam uma complexa interação entre os minerais presentes, resultando na formação de novas fases minerais estáveis a altas temperaturas.

A Figura 42 mostra o difratograma da formulação S₁₀, em seu estado natural, evidenciando-se a presença das fases minerais quartzo (SiO₂), muscovita (KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂), microclínio (KAlSi₃O₈), flogopita (KMg₃AlSi₃O₁₀(OH)₂), talco (Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂) e caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄); confirmada pela análise química dos óxidos predominantes. A flogopita, pertencente à classe dos filossilicatos, é caracterizada por uma estrutura cristalina composta por camadas alternadas de tetraedros de sílica e octaedros que

contêm magnésio. O talco, por sua vez, é identificado por sua estrutura lamelar composta por camadas de tetraedros de sílica e octaedros de magnésio, conforme detalhado na pesquisa de Yin, Zhu e Zeng, (2010).

Figura 42 – Difratoograma de raios - X com a evolução térmica da formulação S₁₀, antes e após a queima. Fases cristalinas identificadas = Q: Quartzo. Mi: Microclínio. Ms: Muscovita. K: Caulinita. Mu: Mullita. F: Flogopita. T: Talco. δ: Metacaulinita. E: Enstatita. Ce: Clinoenstatita. C: Cristobalita.



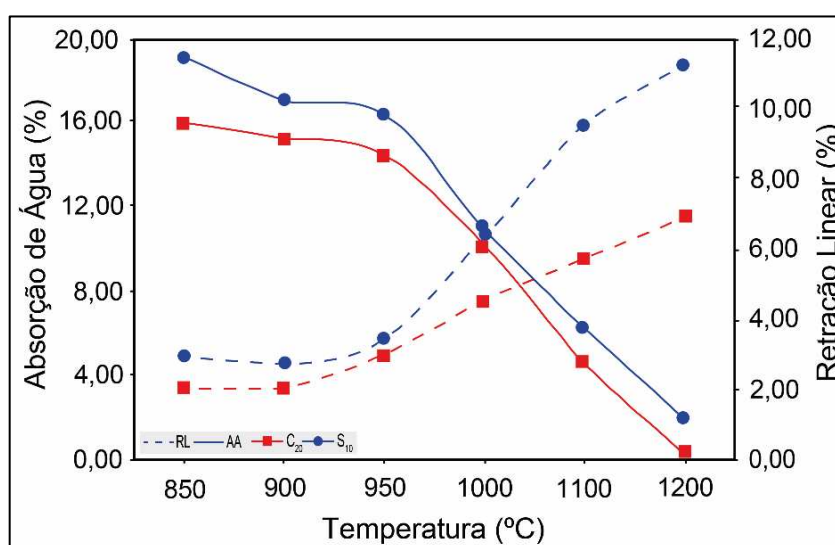
Fonte: Elaborado pela autora.

A evolução térmica da formulação S₁₀ comprova que entre 850 e 950 °C ocorre a desidroxilação da caulinita para formação de metacaulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 + 2\text{H}_2\text{O}$), resultando em uma fase amorfa sem estrutura definida; conforme Santos *et al.* (2013) e Menshaz *et al.* (2017). O talco aquecido nesta faixa de temperatura se desidroxila para formar enstatita e sílica amorfa, através da reação ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \rightarrow 3\text{MgSiO}_3 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$), como descrito por Moore e Reynolds (1997).

Entre 1000 e 1100 °C, ocorre a recristalização da metacaulinita e do quartzo, formando mullita e cristobalita. E, a 1200 °C, mullita e cristobalita tornam-se as fases dominantes, enquanto a enstatita formada recristaliza como clinoenstatita, um polimorfo de alta temperatura de MgSiO_3 .

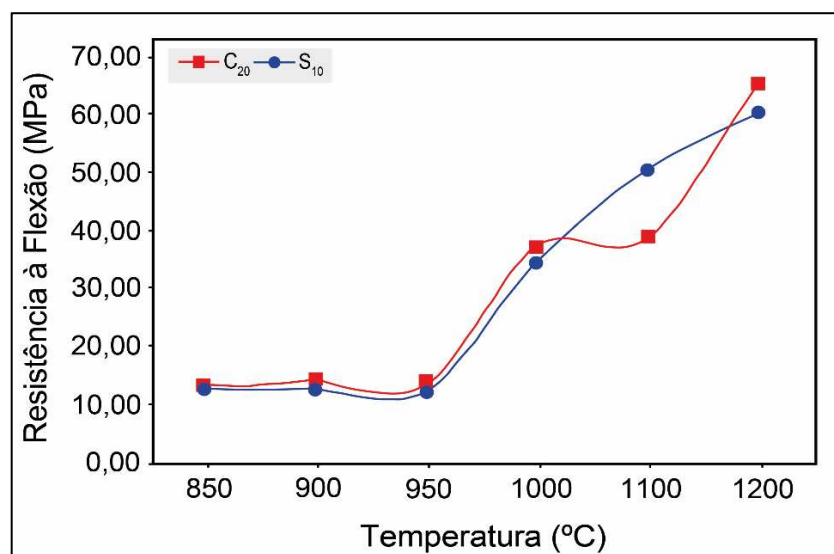
A análise do gráfico de gresificação, ilustrado na Figura 43, revela que a sinterização das formulações cerâmicas S_{10} e C_{20} torna-se significativa apenas em temperaturas a partir de 1000 °C e 1050 °C, respectivamente. Em temperaturas abaixo desses valores, as formulações apresentam retração linear de queima pouco expressiva, elevada absorção de água, superior a 15 %, e baixa resistência à flexão, conforme evidenciado na Figura 44, sugerindo que a microestrutura do material permanece porosa e que a coesão entre as partículas é insuficiente para proporcionar as propriedades mecânicas desejáveis.

Figura 43 - Curva de gresificação das formulações C_{20} e S_{10} .



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 44 – Resistência à flexão em função da temperatura para as formulações C_{20} e S_{10} .



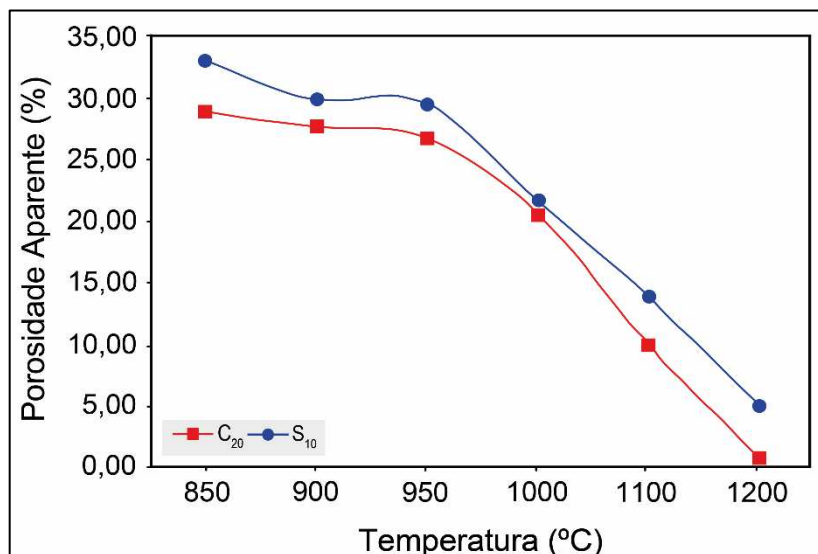
Fonte: Elaborado pela autora.

A sinterização das formulações cerâmicas S₁₀ e C₂₀ evidencia um comportamento termicamente ativado, com aumento significativo na retração linear de queima em temperaturas elevadas. Especificamente, a formulação S₁₀ demonstra um crescimento expressivo na retração linear a partir de 1000 °C, com valores que se ampliam de 2,75 % a 11,23 % quando a temperatura atinge 1200 °C. Por outro lado, a formulação C₂₀ mostra uma resposta semelhante, mas iniciando de forma mais tardia, com a retração linear aumentando de 2,08 % a 6,86 % a partir de 1050 °C até 1200 °C. Essa variação sugere que a densificação das amostras, através do fechamento de poros e da formação de fase líquida, é mais acentuada em temperaturas superiores a 1000 °C, especialmente na formulação S₁₀, refletindo uma maior eficiência do processo de sinterização.

A análise da resistência mecânica das formulações cerâmicas S₁₀ e C₂₀, conforme apresentado na Figura 44, revela uma significativa variação dos valores em função da temperatura de queima. Observa-se que, para a formulação S₁₀, a resistência varia entre 12,45 MPa e 60,39 MPa, indicando um aumento substancial à medida que a temperatura de queima se eleva, sugerindo uma densificação progressiva do material. De forma similar, a formulação C₂₀ exibe uma variação de resistência entre 12,60 MPa e 65,50 MPa, evidenciando um comportamento análogo, porém com valores ligeiramente superiores no ápice da resistência. Esses resultados indicam que ambas as formulações demonstram uma resposta positiva à sinterização, com melhoria nas propriedades mecânicas à medida que a temperatura de queima aumenta.

Os dados de porosidade aparente das formulações cerâmicas S₁₀ e C₂₀, apresentados na Figura 45, exibem um comportamento semelhante ao observado para o parâmetro de absorção de água.

Figura 45 – Porosidade Aparente em função da temperatura para as formulações C₂₀ e S₁₀.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de resistência à flexão, retração linear de queima, porosidade aparente e absorção de água, as formulações cerâmicas C₂₀ e S₁₀ podem ser classificadas conforme as normas ABNT aplicáveis. A formulação C₂₀, ao atingir 1200 °C, apresenta absorção de água de 0,29 % e resistência à flexão de 65,5 MPa, o que a classifica como porcelanato segundo a ABNT NBR 13818:2017, que especifica placas cerâmicas para revestimento. Já a formulação S₁₀, com absorção de água de 1,99 % e resistência à flexão de 60,39 MPa a 1200 °C, enquadra-se como grés porcelânico, também de acordo com a ABNT NBR 13818:2017. Em temperaturas mais baixas, como 850 °C e 900 °C, ambas as formulações exibem características de cerâmica vermelha, como alta porosidade aparente e absorção de água superior a 15 %, sendo adequadas para a produção de blocos e tijolos cerâmicos, conforme os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 15310:2019 e ABNT NBR 15270-1:2017, que regem os componentes cerâmicos para alvenaria e telhas cerâmicas, respectivamente.

5.4 Conclusões

A análise química e mineralógica das matérias-primas, bem como o comportamento das formulações cerâmicas ao longo das diferentes temperaturas de queima, forneceu informações valiosas sobre o potencial dessas composições para aplicações industriais. A argila (A) demonstrou uma composição rica em óxidos de silício (SiO₂) e

alumínio (Al_2O_3), com baixos teores de óxidos fundentes, o que indica sua adequação para a produção de materiais cerâmicos de alta qualidade. Em contrapartida, os resíduos de esmeralda dos garimpos de Carnaíba (C) e Socotó (S) apresentaram uma maior concentração de óxidos fundentes, especialmente nas amostras S, o que favorece a síntese de mulita e outras fases de alta temperatura, como a indialita.

O comportamento físico das peças cerâmicas foi avaliado por meio dos ensaios de retração linear e absorção de água. Os resultados revelaram que, à medida que a temperatura de queima aumenta, há uma progressiva sinterização das peças, resultando em maior retração e menor absorção de água, principalmente nas formulações C₂₀ e S₁₀ com teores de resíduo de esmeralda de 20 % e de 10 %, respectivamente. Essa sinterização é facilitada pela formação de uma fase líquida que promove o denso empacotamento das partículas e a redução da porosidade.

Os ensaios de resistência à flexão indicaram que as formulações com adição de resíduo de esmeralda apresentaram um desempenho térmico e mecânico aceitável, especialmente a partir de 1000 °C, quando a formação de mulita e outras fases contribuiu para o aumento da resistência mecânica. No entanto, foi observada uma leve tendência a diminuição da resistência em temperaturas de 1100 °C nas formulações C e S com teores de 30 % a 50 % de resíduo, o que pode estar relacionado à expansão térmica das micas e à formação de trincas internas devido à transformação estrutural do quartzo.

Em altas temperaturas, por volta de 1200 °C, a formulação C₂₀ destacou-se por apresentar excelente estabilidade térmica, sinterização e resistência mecânica, sendo especialmente indicada para aplicações no setor cerâmico, como revestimentos e pisos, que exigem alta durabilidade e baixa absorção de água. A formulação S₁₀, por sua vez, mostrou-se promissora para a produção de materiais cerâmicos avançados, com potencial para aplicações no setor industrial civil, devido à sua capacidade de formar fases como a mulita e a indialita, que conferem elevada resistência mecânica e estabilidade térmica superior, características essenciais para materiais estruturais e revestimentos de alta desempenho.

Além disso, as formulações C₂₀ e S₁₀ demonstraram considerável potencial para uso no setor de cerâmica vermelha. Em temperaturas mais baixas, como 850 °C e 900 °C, ambas as formulações exibiram alta porosidade aparente e absorção de água superior a 15 %, propriedades típicas de materiais utilizados na produção de blocos e tijolos cerâmicos, conforme os critérios estabelecidos nas normas ABNT NBR 15310:2019 e ABNT NBR 15270-1:2017. Assim, as formulações C₂₀ e S₁₀ podem ser consideradas versáteis, adequadas

tanto para revestimentos cerâmicos de alto desempenho quanto para produtos de cerâmica vermelha em temperaturas de queima mais baixas.

Conclui-se, portanto, que a incorporação de 10% do resíduo de esmeralda do garimpo de Socotó e 20% do resíduo de esmeralda do garimpo de Carnaíba nas formulações cerâmicas é a mais adequada para alcançar as propriedades físicas e mecânicas desejadas. Por outro lado, teores superiores aos apresentadas necessitam de investigações adicionais para fim de melhoria do desempenho das formulações. Este estudo contribuiu significativamente para o desenvolvimento de uma solução sustentável visando o aproveitamento do resíduo de esmeralda, um material que atualmente impacta negativamente o meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFC pelo apoio e suporte financeiro para realização das atividades de campo. Ao Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) pela realização de análises; Ao grupo de pesquisa AEEP do IFBA pelo apoio e suporte técnico. Aos Laboratórios de Degradação e Estabilização e Compostos (LabDEC) e de Ensaio Mecânicos da Universidade de Brasília (UnB) pelo suporte no desenvolvimento nos ensaios tecnológicos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13818**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15310**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2019.

ACEVEDO, Nancy Isabel Álvarez; ROCHA, Marisa; BERTOLINO, Luiz Carlos. Mineralogical characterization of natural clays from Brazilian Southeast region for industrial applications. *Cerâmica*, v. 63, n. 366, p. 253-262, 2017. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/317133042>. Acesso em: 26 ago. 2024.

BABISK, Michelle *et al.* Incorporation of quartzite waste in red ceramic. **HOLOS**, v. 28, n. 6, p. 169, 2012.

BURCH, Robert. Preparation of high surface area reduced molybdenum oxide catalyst. **Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases**, v. 74, p. 2982-2990, 1978. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/F19787402982>. Acesso em: 26 ago. 2024.

CAVALCANTE, Ronaldo Fonseca. **Estudo do potencial de utilização do resíduo da extração de esmeraldas na fabricação de cerâmica de revestimento**. 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

CAVALCANTE, Ronaldo *et al.* Utilização do resíduo da extração de esmeraldas em uma formulação de massa de revestimento cerâmico. **Cerâmica**, v. 58, p. 158-164. 2012.

COSTA, Bruno Ferreira. **Caracterização geológica, petrográfica e litogeoquímica do granito de carnaíba: Potencial metalogenético para lítio**. 2019. 81 f. Monografia (Bacharel em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019.

IRVINE, John; MURPHY, Richard. **Ceramic materials: Science and engineering**. Springer, 2018.

KANG, Suk-Joong. **Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure**. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/259781835>. Acesso em: 26 ago. 2024.

KUMAR, Manoj; PATEL, Ashutosh. **Modern ceramic engineering: Advances in processing, characterization, and applications**. CRC Press, 2022.

MACEDO, Ronaldo *et al.* Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 54, p. 411-417, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-9132008000400005>. Acesso em: 26 ago. 2024.

MENEZES, Renato *et al.* Estudo sobre as propriedades de cerâmicas vermelhas incorporadas com resíduos de quartzito. **Cerâmica**, v. 52, n. 321, 2006.

MENSHAZ, Abdullah; JOHARI, Megat; AHMAD, Zainal. Characterization of metakaolin treated at different calcination temperatures. **AIP Conference Proceeding**, v. 1892, n. 1, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5005659>. Acesso em: 26 ago. 2024.

MOORE, Duane; REYNOLDS, Robert. **X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1997.

MORENO, Márcia *et al.* Caracterização de argilas e composição de massas cerâmicas preparadas com base na análise de curvas de consistência de misturas argila-água. **Cerâmica**, v. 62, n. 361, p. 21-31, 2016.

PRADO, Carolina Mangieri de Oliveira. **Caracterização Química e Mineralógica das Argilas Utilizadas na Produção de Cerâmica Vermelha no Estado de Sergipe**. 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Núcleo de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/6126>. Acesso em: 26 ago. 2024.

SANTOS, Pécisio de Souza. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1989.

SANTOS, Samara *et al.* Estudo cinético do processo de desidroxilação da caulinita. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 57., 2013, João Pessoa. **Anais** [...]. João Pessoa: ABCERAM, 2013. p. 1775-1787.

SCHROEDER, Carlos; KALIDINDI, Suresh. **High-performance ceramic materials: Advances in processing and applications**. Wiley, 2023.

SILVEIRA, Marina Duque. **Utilização de resíduos de mineração na construção civil**. 2015. 49 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SOKHANVAR, Saeed; SADEGHI, Mohammad. **Advances in ceramics: synthesis, processing, and applications**. Oxford: Elsevier, 2020.

VIEIRA, Carlos *et al.* Incorporação de lama de alto forno em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 53, p. 381-387, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/240971747>. Acesso em: 26 ago. 2024.

YIN, Qingrui; ZHU, Binghe; ZENG, Huarong. **Microstructure, property and processing of functional ceramics**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.

6 AVALIAÇÃO DE COR E BRILHO EM AMOSTRAS CERÂMICAS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO MINERAL DA EXTRAÇÃO DE ESMERALDAS DOS GARIMPOS DE CARNAÍBA E SOCOTÓ, NORDESTE DA BAHIA

RESUMO

A coloração e a luminosidade representam atributos de grande importância nos produtos cerâmicos, sendo estes normalmente categorizados como de base vermelha ou branca. A variação cromática das massas cerâmicas é influenciada por diversos fatores, incluindo a presença de óxidos corantes em sua composição química e o processamento ao qual a matéria-prima é submetida. Este estudo investiga a coloração e luminosidade de massas cerâmicas formuladas com resíduos da exploração de esmeraldas dos garimpos de Carnaíba e Socotó - BA, com ênfase nas categorias de base vermelha e branca. O objetivo é analisar a influência dos óxidos de ferro, titânio e molibdênio na coloração e o efeito da temperatura de queima. Corpos de prova com concentrações de óxidos corantes entre 4,93 % e 5,42 % foram queimados a 850, 900, 950, 1000, 1100 e 1200 °C e caracterizados pelo método CIELab. Os resultados mostram que os óxidos corantes influenciam significativamente a cor das massas cerâmicas, com mudanças perceptíveis em temperaturas mais altas. A formulação S₁₀, com resíduo de Socotó, não só preservou, mas também potencializou as características desejáveis de cor e brilho das peças cerâmicas, indicando qualidade e funcionalidade superiores. Assim, sugerimos o uso sustentável dos resíduos de esmeralda na produção de cerâmicas de alta qualidade.

Palavras-chave: reutilização mineral; coloração; propriedades ópticas; sustentabilidade.

ABSTRACT

Color and luminosity are critical attributes in ceramic products, typically categorized as red or white based. The chromatic variation of ceramic bodies is influenced by several factors, including the presence of coloring oxides in their chemical composition and the processing to

which the raw material is subjected. This study investigates the color and luminosity of ceramic bodies formulated with waste from emerald mining in the Carnaíba and Socotó - BA regions, with a focus on red and white-based categories. The objective is to analyze the influence of iron, titanium, and molybdenum oxides on color and the effect of firing temperature. Specimens with coloring oxide concentrations between 4.93 % and 5.42 % were fired at 850, 900, 950, 1000, 1100, and 1200 °C and characterized using the CIELab method. The results show that the coloring oxides significantly influence the color of the ceramic bodies, with noticeable changes at higher temperatures. The S₁₀ formulation, containing Socotó waste, not only preserved but also enhanced the desirable color and brightness characteristics of the ceramic pieces, indicating superior quality and functionality. Thus, we suggest the sustainable use of emerald waste in the production of high-quality ceramics.

Keywords: mineral reuse; coloration; optical properties; sustainability.

6.1 Introdução

A cor resultante da sinterização de massas cerâmicas é um fator determinante na escolha pelo consumidor e na qualidade final do produto. A crescente demanda por produtos cerâmicos uniformes, tanto tecnologicamente quanto esteticamente, exige das indústrias um controle rigoroso dos processos produtivos para garantir produtos padronizados e de alta qualidade. Para tanto, as inovações são necessárias para garantir a excelência no acabamento e desempenho dos materiais cerâmicos (FEITOSA *et al.*, 2013).

Diversos métodos são utilizados na formulação de massas cerâmicas para alcançar propriedades específicas e otimizar a produtividade e o atendimento às normas ambientais (OLIVEIRA; HOTZA, 2011). Minerais industriais não metálicos são essenciais na manufatura de produtos cerâmicos, conferindo propriedades físicas e químicas específicas (MOTTA *et al.*, 2002).

A indústria ceramista classifica as massas cerâmicas pela cor resultante após a queima em produtos de queima branca e queima vermelha; influenciadas pela presença de óxidos corantes como ferro e titânio. Cerâmicas de queima branca requerem controle rigoroso da composição e condições de queima, enquanto cerâmicas de queima vermelha, usadas em produtos de construção, beneficiam-se de uma produção mais eficiente devido a temperaturas de queima mais baixas (DUTRA *et al.*, 2005; BARBA *et al.*, 1997).

Reconhecendo a importância das características das massas cerâmicas, este estudo avaliou a incorporação de resíduos da exploração de esmeraldas por meio da análise química e mineralógica de duas formulações distintas: uma com 10 % de resíduo de esmeralda do Garimpo de Socotó e outra com 20 % de resíduo de esmeralda do Garimpo de Carnaíba. A escolha das formulações com 10% de resíduo do Garimpo de Socotó e 20% de resíduo do Garimpo de Carnaíba para este estudo se baseia em resultados de pesquisas anteriores, que indicaram um desempenho superior dessas composições em relação a outras concentrações.

Foram analisadas e discutidas as alterações químicas e mineralógicas, a intensidade do brilho e a influência dos óxidos de ferro, titânio e molibdênio na coloração das massas cerâmicas, utilizando-se para tanto o método CIELab para investigar as mudanças de cor em função da temperatura de queima. O objetivo deste trabalho foi determinar a coloração e luminosidade de massas cerâmicas formuladas com resíduos de exploração de esmeraldas, procurando avaliar a melhor formulação para aplicações na produção de cerâmica vermelha e/ou de revestimento.

Este estudo está alinhado com os objetivos da Agenda 2030 da ONU, que é um plano global que busca promover a sustentabilidade e a eficiência no setor de mineração e na indústria ceramista ao analisar o aproveitamento dos resíduos minerais provenientes da exploração de esmeraldas na região nordeste da Bahia.

6.2 Materiais e Métodos

Os resíduos minerais foram obtidos dos garimpos de esmeraldas de Carnaíba (Pindobaçu-BA) e Socotó (Campo Formoso-BA), enquanto a argila foi adquirida no depósito localizado no Distrito de Umbuzeiro-BA. As amostras foram identificadas como A (argila), C (resíduo de Carnaíba) e S (resíduo de Socotó), secas a 60 °C por 24 horas, destorroadas e peneiradas com malha de 74 µm, utilizando peneira ABNT #200 mesh. As formulações das massas cerâmicas foram preparadas com as seguintes proporções: C₂₀ (80 % argila + 20 % resíduo de Carnaíba) e S₁₀ (90 % argila + 10 % resíduo de Socotó). As misturas foram homogeneizadas em moinho de bolas durante 15 minutos e, em seguida, umedecidas com 10 % de água destilada para aquisição de plasticidade; favorecendo a etapa seguinte de compactação dos corpos de prova.

A conformação dos corpos de prova foi realizada em matriz metálica (60 mm x 20 mm x 6 mm) utilizando prensa hidráulica Bonevau (15 toneladas) à pressão de 5 MPa, com secagem a 110 °C por 24 horas.

As análises químicas e mineralógicas das matérias-primas e formulações foram realizadas em uma fluorescência e difração de raios - X Bruker S8 Tiger com fonte de Rh e espectrômetro WDS e no difratômetro de raios - X o Bruker D8 Discover equipado com uma fonte monocromática de cobre $K\alpha_1$, respectivamente. As análises térmicas (DSC/TG/MS) foram conduzidas com o analisador térmico Netzsch STA 449 F3 Nevio acoplado a um espectrômetro de massa QMS 403 Aeolos.

Os processos térmicos foram realizados em forno mufla Quimis, com ciclo térmico de isoterma de 1 hora nas temperaturas de 850, 900, 950, 1000, 1100 e 1200 °C. As características químicas e mineralógicas pós-queima foram reavaliadas por fluorescência e difração de raios - X.

Na avaliação da intensidade do brilho, cada corpo de prova teve um círculo de 1 cm demarcado e três leituras foram feitas utilizando Glossmeter Metrotokyo (ângulo de 60°). A média aritmética das leituras foi calculada e a intensidade do brilho determinada em termos percentuais em relação à temperatura de queima. A análise colorimétrica foi realizada no espaço CIELab com o colorímetro portátil Linshang LS173B, medindo os parâmetros L^* (luminosidade), a^* (verde-vermelho) e b^* (azul-amarelo).

A variação de tonalidade (ΔE) foi calculada comparando as coordenadas L^* , a^* e b^* das amostras de teste com a amostra padrão, utilizando a Equação (7).

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (7)$$

Onde as variações das coordenadas L^* (ΔL), a^* (Δa) e b^* (Δb) são calculadas subtraindo-se o valor da amostra teste do valor da amostra padrão (TEIXEIRA *et al.*, 2012), assim, permitindo a comparação entre as variações de tonalidade das formulações com resíduo de Carnaíba (C_{20}) em relação às amostras com o resíduo de Socotó (S_{10}).

6.3 Resultados e Discussão

6.3.1 Caracterização das Matérias-Primas

A Tabela 6 apresenta os resultados da análise química das matérias-primas. Na análise da argila (A), o óxido de silício (SiO_2) apresenta o maior percentual dentre os elementos, seguido pelos óxidos de alumínio (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3). Esses resultados

indicam o potencial dessa argila para a produção de materiais cerâmicos de alta qualidade (VIEIRA *et al.*, 2007; PRADO, 2011). Também se detecta a presença de óxidos fundentes (K_2O , Na_2O , CaO e MgO) em concentrações baixas, cuja soma totaliza 2,15 %.

Tabela 6 – Composição química das matérias-primas estudadas.

Óxidos	A	C	S	C ₂₀	S ₁₀
	% em peso				
SiO_2	54,29	34,98	47,09	50,80	54,49
Al_2O_3	28,34	11,65	9,71	22,59	23,72
Fe_2O_3	4,35	4,28	8,70	4,40	4,83
TiO_2	0,63	0,17	0,22	0,53	0,59
MnO	<LQ	0,11	0,14	<LQ	<LQ
MgO	0,50	11,99	23,59	3,23	3,38
CaO	<LQ	13,62	2,24	2,82	0,31
Na_2O	0,36	0,16	0,25	0,34	0,38
K_2O	1,29	3,87	4,82	1,88	1,72
P_2O_5	<LQ	9,93	<LQ	1,88	<LQ
SO_3	0,11	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
MoO_3^*	<LQ	6,40	<LQ	2,13	<LQ
<i>LOI</i>	10,75	3,64	4,12	9,38	10,13
<i>Total</i>	100,62	100,80	100,89	99,96	99,56

Fonte: Elaborado pela autora. <LQ: Abaixo do limite quantificável. MoO_3^* : Resultado semiquantitativo.

Analogamente à composição da argila, nas amostras dos resíduos de Carnaíba (C) e Socotó (S) verifica-se a predominância dos óxidos de silício (SiO_2) e alumínio (Al_2O_3). Contudo, as concentrações de óxidos fundentes são mais elevadas nessas matérias-primas, alcançando 29,64 % na amostra C e 30,90 % na amostra S.

A quantidade de óxidos fundentes presentes nas matérias-primas foi maior na amostra S, sendo estes importantes para o processo de síntese do mineral mulita ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), pois irão favorecer o processo de difusão devido a formação da fase líquida.

O material que possui maior relação alumina/sílica é a amostra S (4,85), sendo a amostra de argila (A) a que teve menor relação (2,09). Este é inclusive, um parâmetro significativo para o processo de obtenção da mulita ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$).

A presença significativa de óxido de ferro (Fe_2O_3) nas amostras estudadas é um fator determinante para a coloração avermelhada observada nas amostras após o processo de queima. A matéria-prima com maior quantidade de óxido de ferro é a amostra S (8,70 %), e o material com menor percentual desse óxido é encontrado na amostra C (4,28 %). Os óxidos de ferro (Fe_2O_3), titânio (TiO_2), cálcio (CaO) e magnésio (MgO) estão frequentemente associados à coloração da cerâmica vermelha após a queima (PRADO, 2011).

Na formulação C₂₀, que incorpora resíduo proveniente do garimpo de Carnaíba, destaca-se a presença significativa de óxido de fósforo (P₂O₅), aproximadamente 2,1 %, e de óxido de molibdênio (MoO₃), em torno de 1,8 %. Em altas temperaturas de queima, o P₂O₅, em combinação com a sílica (SiO₂), pode atuar como fundente e opacificante, funcionando como formador de vidro (KANG, 2004; IRVINE; MURPHY, 2018; SOKHANVAR; SADEGHI, 2020; SCHROEDER; KALIDINDI, 2023).

O óxido de molibdênio (MoO₃), por outro lado, é descrito na literatura como um agente redutor em massas cerâmicas, e não como fundente ou estabilizador (BURCH, 1978; KUMAR; PATEL, 2022). Durante o processo de queima, o óxido de molibdênio (MoO₃) pode reagir com outros óxidos, promovendo a redução das peças cerâmicas. Esta capacidade redutora pode influenciar a formação de fases minerais específicas, como a powellita (CaMoO₄), evidenciado nas análises térmicas e de difração de raios - X.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados das análises de enxofre e carbono elementares das matérias-primas utilizadas na composição da massa cerâmica, destacando suas médias, desvios padrão e variações percentuais relativas (%RSD).

Tabela 7 – Análises de enxofre e carbono elementares das matérias-primas.

Amostras	Enxofre (M)	Enxofre (DP)	Enxofre (% RSD)	Carbono (M)	Carbono (DP)	Carbono (% RSD)
A	0,02%	0,01%	22,3	0,72%	0,00%	0,115
C	3,82%	0,16%	4,26	0,14%	0,00%	1,75
S	0,02%	0,02%	127	0,31%	0,00%	0,985

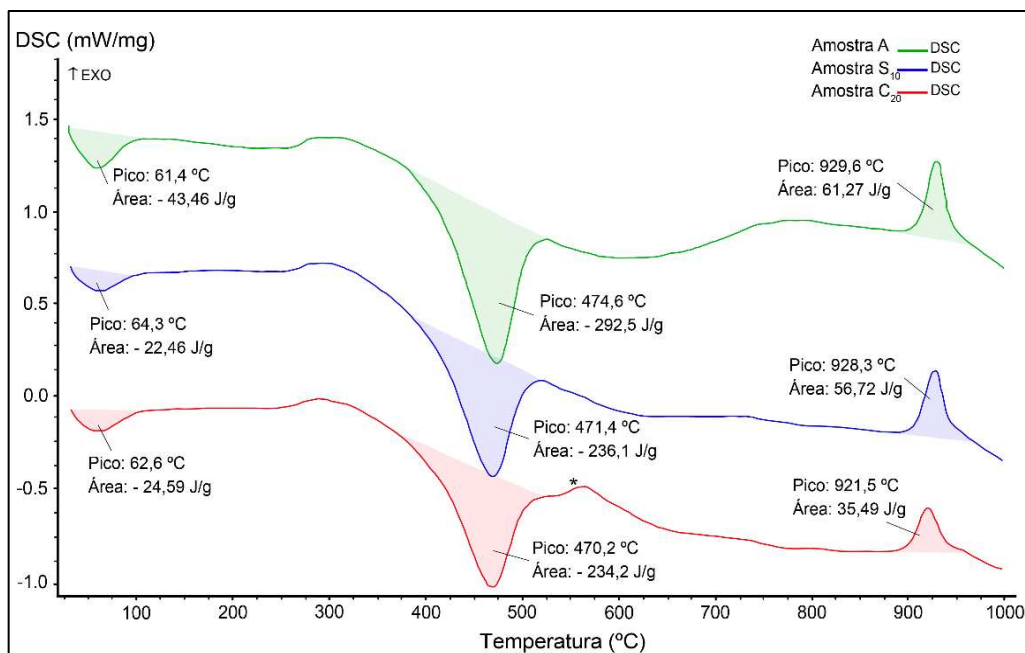
Fonte: Elaborado pela autora. M: Média. DP: Desvio Padrão. %RSD: Desvio Padrão Relativo.

As análises de enxofre e carbono das matérias-primas revelam variações significativas entre os materiais. O resíduo de Carnaíba apresentou o maior teor de enxofre (3,82 %) com baixa variabilidade (%RSD de 4,26), enquanto o resíduo de Socotó e a argila apresentaram concentrações muito baixas de enxofre (0,02 %), com o resíduo de Socotó mostrando maior variabilidade (%RSD de 127). Em relação ao carbono, a argila exibiu o maior teor (0,72 %), seguida pelo resíduo de Socotó (0,31 %) e o de Carnaíba (0,14 %), todos com baixa variabilidade, conforme indicado pelos baixos valores de %RSD. Esses resultados fornecem uma visão precisa da composição elementar das amostras.

As análises de Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC), na Figura 46, e Termogravimetria (TG), na Figura 47, revelaram a ocorrência de uma reação endotérmica nas

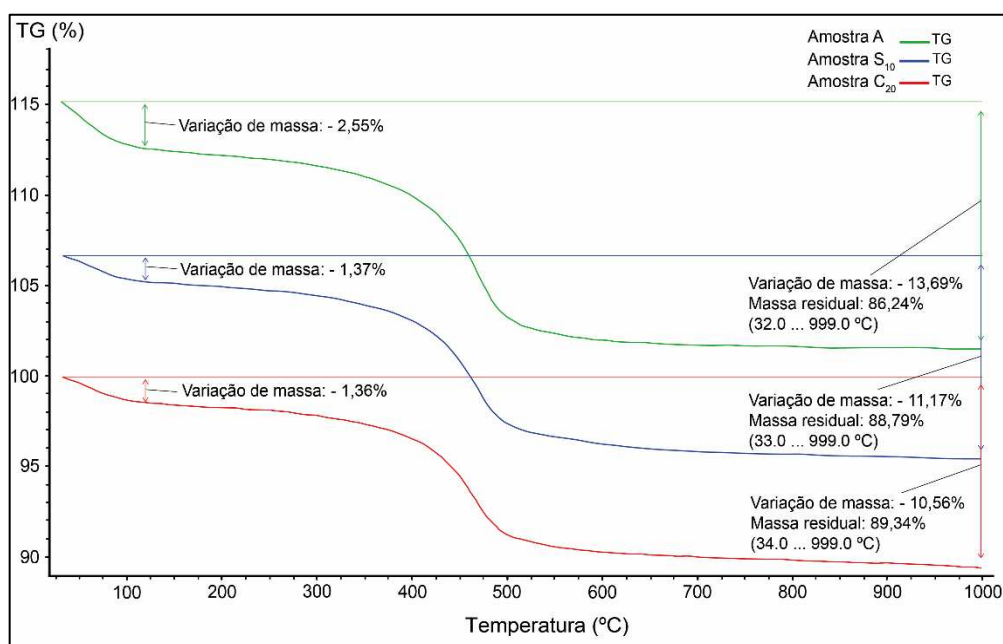
amostras em intervalo de temperatura de 31 a 96 °C, cessando a perda de massa à aproximadamente 120 °C, indicando a desidratação dos minerais argilosos.

Figura 46 - Curva de DSC da argila (A); da formulação com o resíduo do Garimpo Carnaíba (C₂₀) e da formulação com o resíduo do Garimpo Socotó (S₁₀). (* = ustulação do molibdênio).



Fonte: Elaborado pela autora.

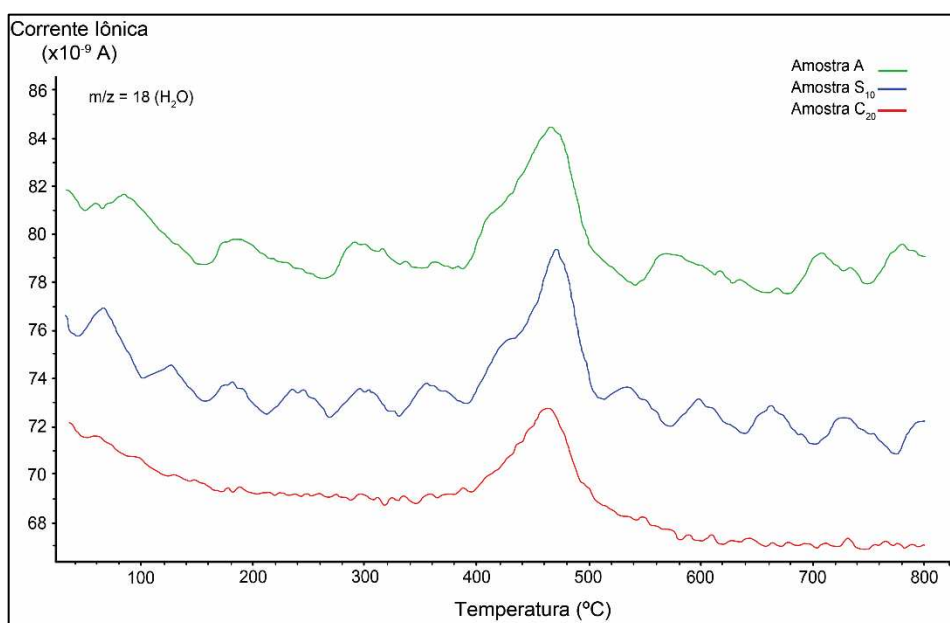
Figura 47 - Curva de TG da argila (A); da formulação com o resíduo de Carnaíba (C₂₀) e da formulação com o resíduo de Socotó (S₁₀).



Fonte: Elaborado pela autora.

No intervalo de temperaturas entre 400 e 500 °C ocorrem reações endotérmicas nas três amostras estudadas, conforme os DSC da Figura 46, com uma perda média de massa de 10 %, conforme observado nas termogravimetrias exibidas na Figura 47, nessas temperaturas ocorrem a desidroxilação da caulinita, que é observado no espectro de massa referente a molécula da água ($m/z=18$), representado na Figura 48.

Figura 48 - Curva de MS da água evoluída ($m/z = 18$) da argila (A), da formulação com resíduo de Carnaíba (C_{20}) e da formulação com o resíduo de Socotó (S_{10}).



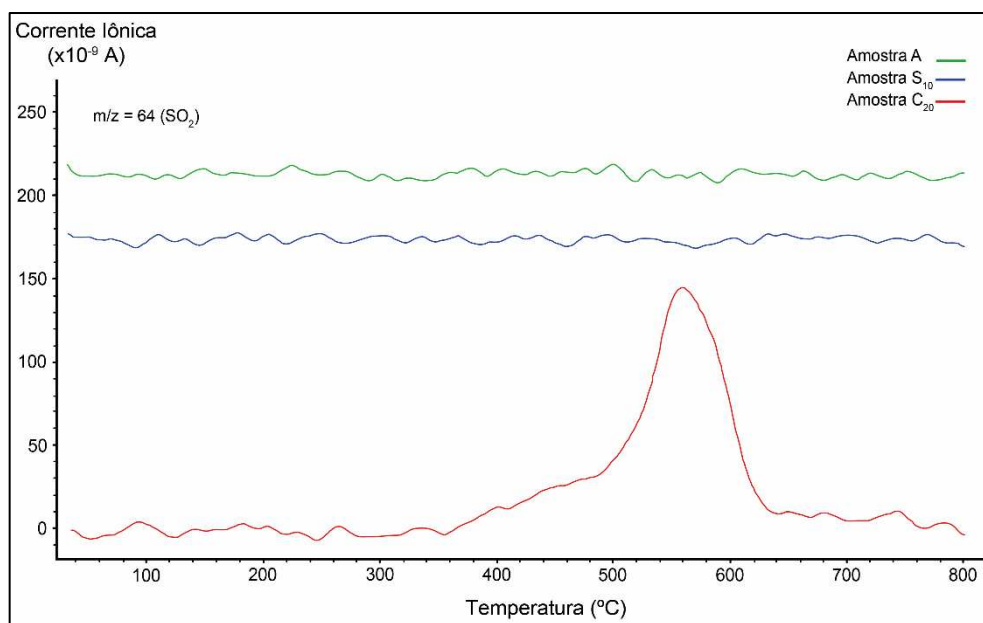
Fonte: Elaborado pela autora.

Ao comparar as temperaturas de desidroxilação das amostras deste estudo com as típicas temperaturas de desidroxilação de minerais argilosos descritas na literatura, nota-se que os valores encontrados são próximos a 700 °C – 850 °C (LUZ; LINS, 2005). Entretanto, em argilominerais com teores mais elevados em ferro (Fe_2O_3), como é o caso estudado, observa-se a presença de um pico endotérmico intermediário entre as temperaturas de 450 °C – 700 °C (AMORIM *et al.*, 2004).

Um evento exotérmico iniciado em 540 °C é observado no DSC da Figura 46, para a formulação C_{20} . Este fenômeno está relacionado ao processo de ustulação da molibdenita (MoS_2), conforme descrito pela equação química: $2MoS_2 + 7O_2 \rightarrow 2MoO_3 + 4SO_2$. Durante este processo, a molibdenita (MoS_2) é submetida a aquecimento na presença de oxigênio (O_2), resultando na oxidação do molibdênio presente na molibdenita e na formação do trióxido de molibdênio (MoO_3), um composto de maior estabilidade. Simultaneamente, o

enxofre contido na molibdenita é convertido em dióxido de enxofre (SO_2 , $m/z=64$), que é liberado como um subproduto gasoso (BRAGA, 2013). Esses resultados são consistentes com os obtidos na análise química e no espectro de massas do SO_2 envolvido, como mostra a Figura 49.

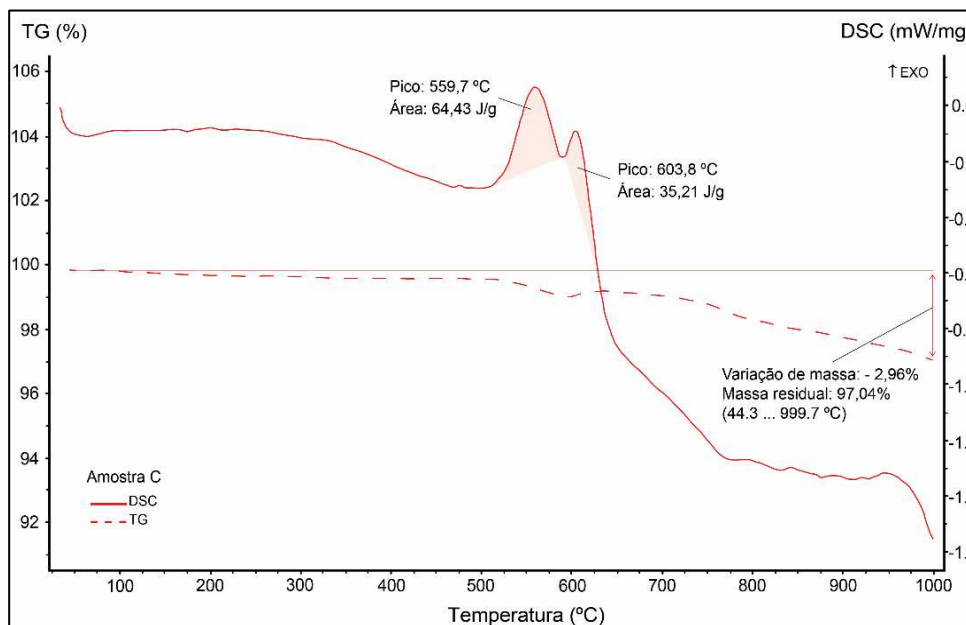
Figura 49 - Curva de MS do SO_2 evoluída ($m/z = 64$) da argila (A), da formulação com resíduo de Carnaíba (C_{20}) e da formulação com o resíduo de Socotó (S_{10}).



Fonte: Elaborado pela autora.

Na análise termogravimétrica (TG) do resíduo de esmeralda do Garimpo de Carnaíba (C), apresentado na Figura 50, foi observada uma redução de massa de aproximadamente 3 % durante a degradação térmica, atribuída à conversão da molibdenita em trióxido de molibdênio ($\text{MoS}_2 \rightarrow \text{MoO}_3$). De acordo com a literatura citada por Souza (2014), esperava-se uma perda de massa em torno de 10 % para o resíduo mineral proveniente do Garimpo de Carnaíba. A reduzida perda pode ser justificada pelas características do minério que inclui a presença de micas em sua composição, as quais, mesmo em temperaturas elevadas, não sofrem degradação térmica significativa.

Figura 50 - Curvas de DSC e TG do resíduo de esmeraldas do Garimpo de Carnaíba (C).

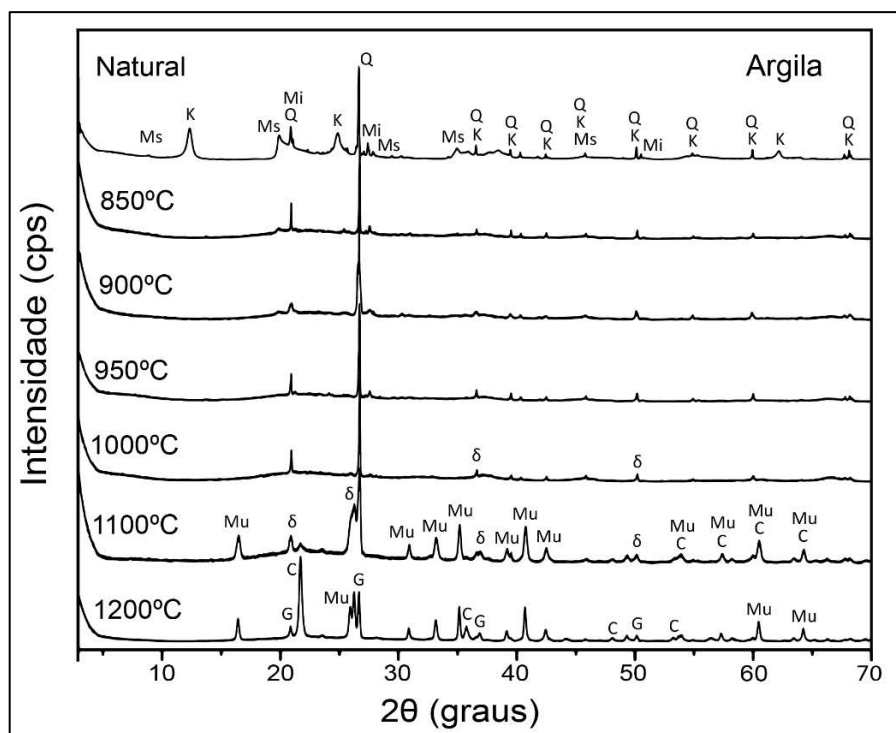


Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 46 verifica-se, ainda, a presença de um pico exotérmico em torno de 930 °C, observado de forma consistente em todas as amostras examinadas. Esse fenômeno é uma reação de recristalização dos argilominerais. Esta característica é particularmente notável no contexto da transformação da caulinita em metacaulinita, conforme discutido por Brindley e Brown (1980); Maia *et al.* (2000); Smith e Parker (2011); Santos *et al.* (2013); Brito (2015); Menshaz *et al.* (2017) na literatura especializada.

Na composição mineralógica da argila, apresentado na Figura 51, observa-se a predominância de quartzo (SiO_2) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), com a presença também de microclínio (KAlSi_3O_8) e muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$). O quartzo, composto por sílica, está coerente com os resultados da análise de composição química. O microclínio é identificado como um silicato de potássio e alumínio, elementos detectados na análise por fluorescência de raios - X. A caulinita é reconhecida pela sua estrutura lamelar, composta por camadas alternadas de octaedros de alumínio e tetraedros de sílica. Já a muscovita é identificada pelo espaçamento entre suas camadas de silicato. A presença dessas fases minerais é fundamental para confirmar a composição mineralógica da argila destinada ao uso cerâmico, em correlação com os dados provenientes de análises químicas e térmicas (ACEVEDO *et al.*, 2017; MACEDO *et al.*, 2008; SANTOS, 1989).

Figura 51 – Difratoograma de raios - X com a evolução térmica e mineralógica da argila pura, antes e após a queima. Fases cristalinas identificadas = Q: Quartzo. Mi: Microclínio. K: Caulinita. Mu: Mulita. Ms: Muscovita. δ : Metacaulinita. C: Cristobalita. G: Gismondina.



Fonte: Elaborado pela autora.

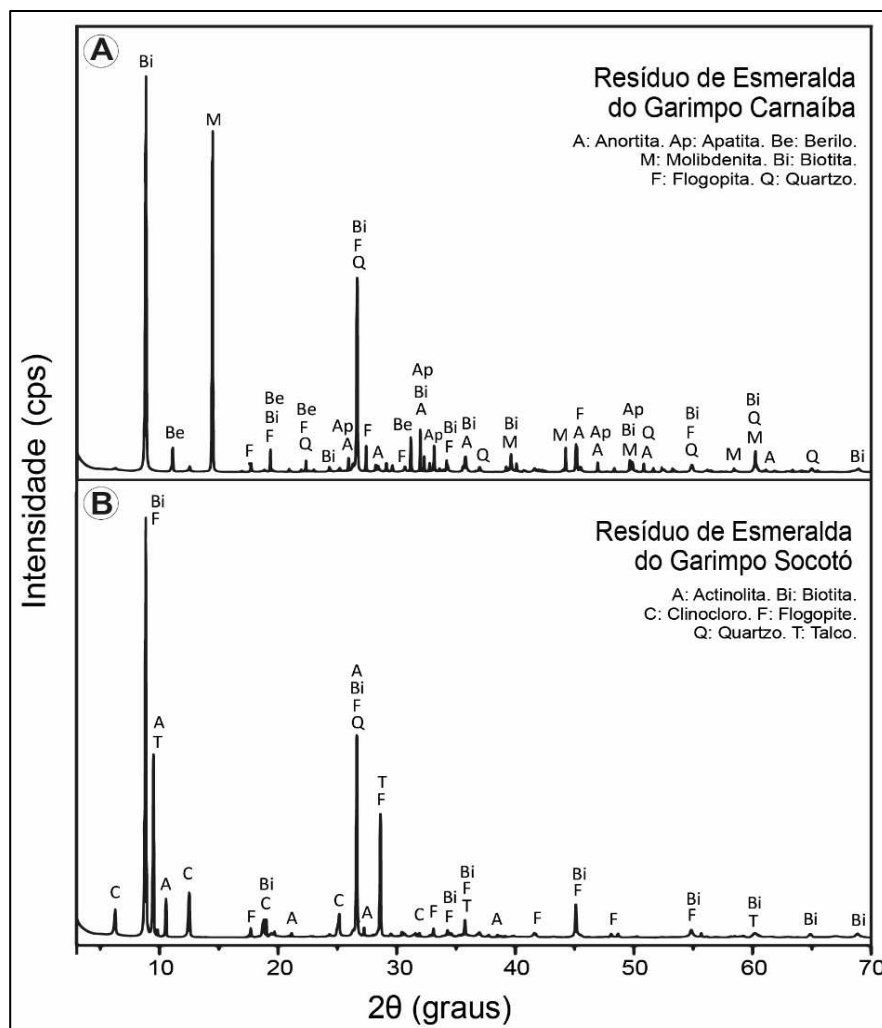
A evolução térmica da argila, com temperaturas variando de 850 a 1200 °C, revelando a presença das fases minerais mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), cristobalita (SiO_2), metacaulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) e gismondina ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). O aquecimento da argila induz a desidroxilação da caulinita, formando metacaulinita (BRINDLEY; BROWN, 1980; SMITH; PARKER, 2011; SANTOS *et al.*, 2013; MENSCHAZ *et al.*, 2017).

A temperatura entre 950 e 1100 °C promove a decomposição do quartzo e da metacaulinita, resultando em mulita e cristobalita, conforme corroborado por análises térmicas. A mulita se forma pela reação entre alumina e sílica ($3\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2 \rightarrow 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), discutida em estudos como os de Schneider *et al.* (2008), que destacam seu papel na resistência mecânica e térmica das cerâmicas.

Na temperatura de 1200 °C, parte da sílica amorfa recristaliza formando cristobalita, uma fase polimórfica de alta temperatura do quartzo (YIN *et al.*, 2010). Em um ambiente ainda rico em sílica e alumina, juntamente com a presença de ferro e outros elementos, observa-se a formação de gismondina (mineral do grupo das zeólitas) a partir da metacaulinita e outras fases amorfas, indicando sua estabilidade durante o aquecimento ou recristalização (HAYASHI *et al.*, 1999; XU *et al.*, 2007).

Os resíduos, cujos difratogramas são apresentados na Figura 52, revelam a composição mineralógica das amostras dos resíduos de esmeralda dos garimpos de Carnaíba e Socotó.

Figura 52 – Difratogramas de raios - X dos resíduos de esmeralda do garimpo de carnaíba e do garimpo de socotó.



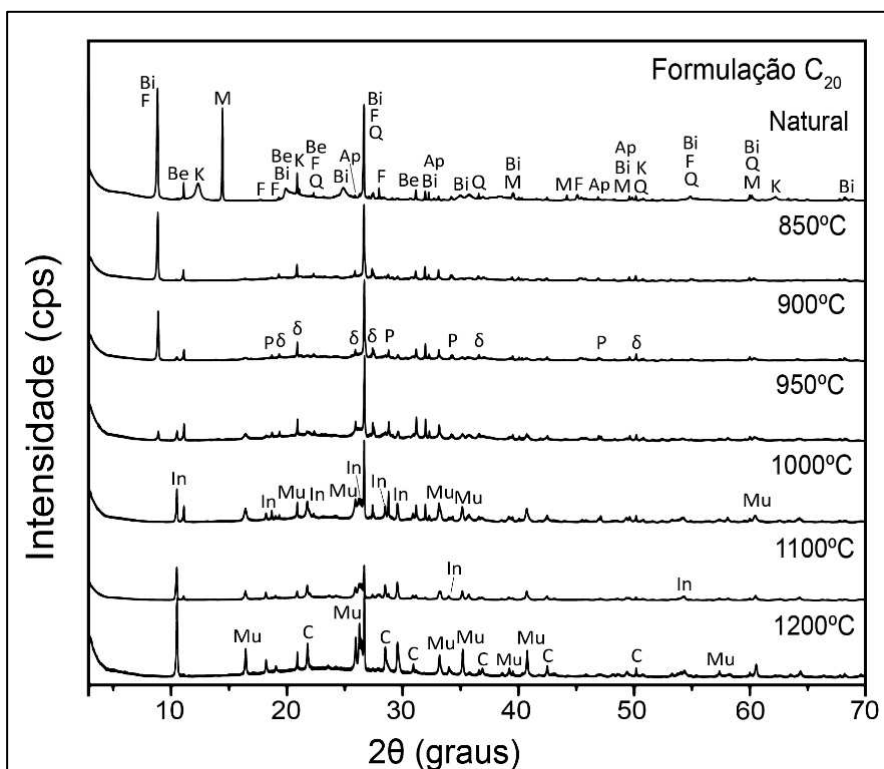
Fonte: Elaborado pela autora.

Os elevados teores de ferro encontrados na composição química dessas amostras estão associados à presença do mineral Biotita ($K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH,F)_2$). A flogopita, cuja composição química é descrita como $(KMg_3(AlSi_3O_{10})(F,OH)_2)$, também é identificada em múltiplas fases dos difratogramas analisados. Na amostra contendo resíduo mineral do Garimpo de Carnaíba destaca-se a presença significativa do mineral molibdenita (MoS_2), o que está em conformidade com os altos teores de óxido de molibdênio (MoO_3) determinados para essa amostra. Observamos também a presença do mineral apatita ($Ca_5(PO_4)_3(F,OH,Cl)$) justificando os elevados teores de fosforo (P_2O_5), presentes nessa amostra. Outros minerais

identificados incluem quartzo (SiO_2), anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), actinolita ($\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), berilo ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$), talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) e clinocloro ($\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_8$), todos pertencentes ao grupo dos silicatos. A composição química desses minerais é consistente com os dados obtidos por fluorescência de raios - X, indicando a presença significativa de cálcio, alumínio, ferro e magnésio. Esses resultados corroboram com os dados apresentados por Vieira *et al.* (2007) e Silva *et al.* (2015) em seus estudos sobre a inclusão de resíduos minerais em massa cerâmica.

Observa-se no difratograma da Figura 53, para a formulação C_{20} (natural/sem queima), a presença das seguintes fases minerais: molibdenita (MoS_2), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), flogopita ($\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F,OH})_2$), anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) (com concentrações baixas), biotita ($\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH,F})_2$), quartzo (SiO_2), apatita ($(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,OH,Cl}))$) e berilo ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$).

Figura 53 – Difratograma de raios - X com a evolução térmica da formulação C_{20} , antes e após a queima. Fases cristalinas identificadas = Q: Quartzo. M: Molibdenita. K: Caulinita. Mu: Mulita. Bi: Biotita. F: Flogopita. Be: Berilo. δ : Metacaulinita. P: Powelita. In: Indialita. C: Cristobalita. Ap: Apatita.



Fonte: Elaborado pela autora.

A evolução térmica da formulação C₂₀ revela que, à medida que a temperatura aumenta, ocorrem transformações significativas nas fases minerais. Entre 850 e 900 °C, a molibdenita começa a oxidar, formando trióxido de molibdênio (MoO₃), enquanto a caulinita desidroxila para formar metacaulinita (Al₂Si₂O₇). A formação de powellita (CaMoO₄) a 900 °C indica que as condições de temperatura são suficientes para iniciar a reação entre os componentes presentes na amostra, especificamente o trióxido de molibdênio (MoO₃), proveniente da oxidação da molibdenita (MoS₂), e o cálcio, possivelmente oriundo da anortita (CaAl₂Si₂O₈).

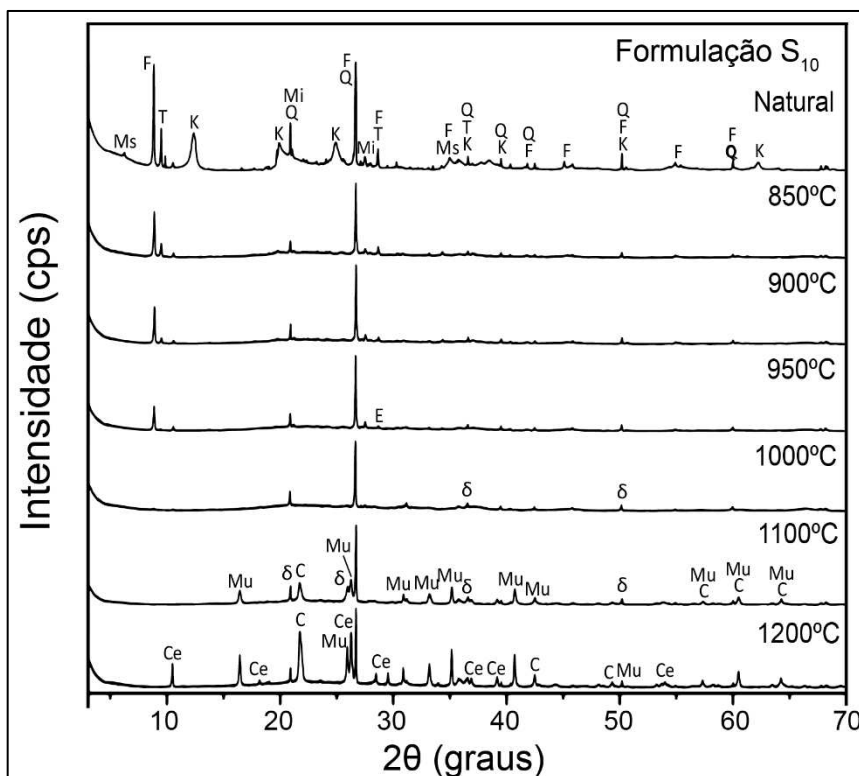
Entre 950 e 1000°C a oxidação da molibdenita continua, e a metacaulinita começa a transformar-se em mulita (3Al₂O₃·2SiO₂). As micas (flogopita e biotita) formam possíveis fases adicionais, como enstatita e outros piroxênios. A powellita permanece estável, mas pode começar a se decompor em temperaturas mais altas.

Na faixa de 1000 a 1100 °C, a formação de mulita a partir de caulinita se intensifica e o quartzo inicia sua transformação para cristobalita.

Entre 1100 e 1200 °C a mulita torna-se mais estável, enquanto a sílica amorfa pode formar-se a partir de resíduos da caulinita. O berilo, ao se decompor, contribui com BeO e Al₂O₃ para a formação de fases complexas, podendo influenciar a formação de mulita. Indialita (a forma hexagonal de cordierita) pode se formar a partir das fases ricas em magnésio, alumínio e sílica em temperaturas superiores a 1100 °C. A cristobalita permanece presente como uma das fases de alta temperatura do quartzo. Essas transformações indicam uma complexa interação entre os minerais presentes, resultando na formação de novas fases minerais estáveis a altas temperaturas.

A Figura 54 mostra o difratograma da formulação S₁₀, em seu estado natural, evidenciando-se a presença das fases minerais quartzo (SiO₂), muscovita (KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂), microclínio (KAlSi₃O₈), flogopita (KMg₃AlSi₃O₁₀(OH)₂), talco (Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂) e caulinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄); confirmada pela análise química dos óxidos predominantes. A flogopita, pertencente à classe dos filossilicatos, é caracterizada por uma estrutura cristalina composta por camadas alternadas de tetraedros de sílica e octaedros que contêm magnésio. O talco, por sua vez, é identificado por sua estrutura lamelar composta por camadas de tetraedros de sílica e octaedros de magnésio, conforme detalhado na pesquisa de Yin *et al.* (2010).

Figura 54 – Difratograma de raios - X da formulação S₁₀ com evolução térmica. Fases cristalinas identificadas = Q: Quartzo. Mi: Microclínio. K: Caulinita. Mu: Mullita. Ms: Muscovita. T: Talco. F: Flogopita. E: Enstatita. Ce: Clinoenstatita. δ : Metacaulinita. C: Cristobalita.



Fonte: Elaborado pela autora.

A evolução térmica da formulação S₁₀ comprova que entre 850 e 950 °C ocorre a desidroxilação da caulinita para formação de metacaulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 + 2\text{H}_2\text{O}$), resultando em uma fase amorfa sem estrutura definida; conforme Santos *et al.* (2013) e Menshaz *et al.* (2017). O talco aquecido nesta faixa de temperatura se desidroxila para formar enstatita e sílica amorfa, através da reação ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \rightarrow 3\text{MgSiO}_3 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$), como descrito por Moore e Reynolds (1997).

Entre 1000 e 1100 °C, ocorre a recristalização da metacaulinita e do quartzo, formando mullita e cristobalita. E, a 1200 °C, mullita e cristobalita tornam-se as fases dominantes, enquanto a enstatita formada recristaliza como clinoenstatita, um polimorfo de alta temperatura de MgSiO_3 .

6.3.2 Intensidade do Brilho

A análise da variação da intensidade do brilho em amostras cerâmicas é um componente essencial na caracterização desses materiais, especialmente em contextos relacionados à cerâmica técnica, estrutural e de revestimento. Esta investigação reveste-se de significativa relevância para a compreensão das variáveis que influenciam a intensidade do brilho, proporcionando informações valiosas sobre a qualidade e o desempenho intrínseco das cerâmicas.

Os resultados, apresentados na Tabela 8, foram obtidos a partir da determinação sistemática da intensidade do brilho nas amostras cerâmicas após os processos de queima.

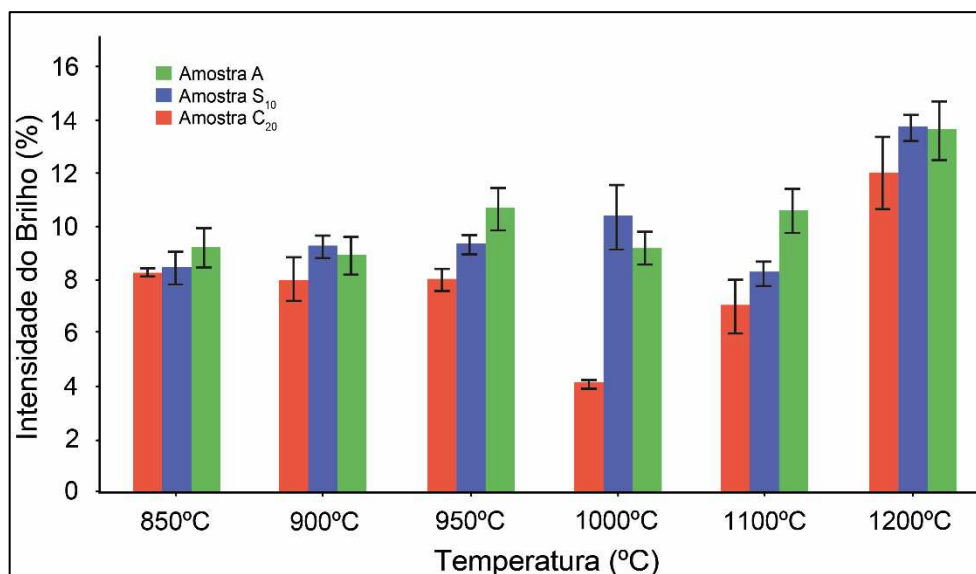
Tabela 8 – Dados em porcentagem obtidos do ensaio de intensidade do brilho das amostras estudadas.

Temperatura	850°C	900°C	950°C	1000°C	1100°C	1200°C
Formulações	Brilho (%)					
A	9,20	8,90	10,63	9,17	10,60	13,63
C ₂₀	8,26	8,03	8,03	4,10	7,00	12,00
S ₁₀	8,43	9,27	9,33	10,37	8,26	13,73

Fonte: Elaborado pela autora.

A comparação dos resultados de intensidade do brilho é imprescindível para discernir as peculiaridades entre a argila e as formulações C₂₀ e S₁₀, permitindo identificar quais amostras apresentaram variações na luminosidade. Este processo de análise possibilitou visualizar as variações na intensidade do brilho de cada formulação, elucidando nuances sutis e contribuindo para uma compreensão aprofundada das propriedades cerâmicas sob consideração. A análise comparativa entre as amostras de argila A e as formulações C₂₀ e S₁₀, é apresentada na Figura 55.

Figura 55 – Intensidade do brilho das amostras A, C₂₀ e S₁₀ em diferentes temperaturas de queima. As barras de erro representam o desvio padrão das medidas de intensidade do brilho, indicando a variação e a consistência das amostras em cada temperatura.



Fonte: Elaborado pela autora.

A amostra A, em geral, apresenta uma intensidade de brilho mais alta e uma variação relativamente menor quando comparada à formulação C₂₀. Essa menor variação, especialmente em temperaturas mais elevadas, sugere uma resposta mais estável da amostra A às mudanças de temperatura, refletindo uma maior consistência nas suas propriedades de brilho.

Por outro lado, a formulação C₂₀ tende a exibir uma intensidade de brilho mais baixa na maioria das temperaturas, exceto a 1200 °C, onde se aproxima da intensidade observada na amostra A. Além disso, a formulação C₂₀ apresenta uma maior variação na intensidade do brilho, notadamente na temperatura entre 900 e 1200 °C. Essa maior variação indica que a formulação C₂₀ possui uma resposta mais sensível e menos consistente às mudanças de temperatura, o que pode sugerir uma instabilidade em suas propriedades físicas quando submetida a diferentes condições térmicas.

Observando a análise de intensidade do brilho para a amostra de argila (A) e a formulação S₁₀, percebe-se que a formulação S₁₀ tende a ter uma menor variabilidade na intensidade do brilho em quase todas as temperaturas de queima, sugerindo uma maior consistência. No entanto, a intensidade do brilho entre as amostras varia dependendo da temperatura, com a argila (A) geralmente apresentando maior intensidade em temperaturas entre 850 e 950 °C e a formulação S₁₀ apresentando maior intensidade em temperaturas entre 900 e 1000 °C, mantendo uma alta intensidade a 1200 °C. Em 1200 °C, ambas as amostras

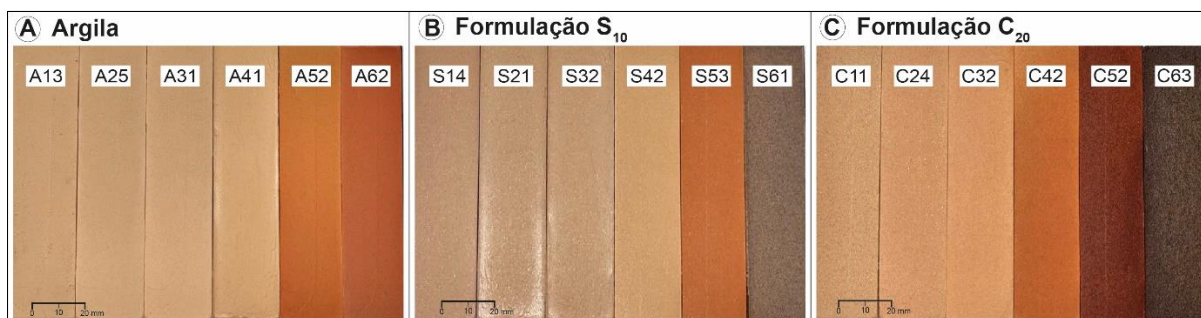
exibem intensidades de brilho muito próximas, mas com a formulação S₁₀ exibindo menor variabilidade.

Comparando-se as análises de intensidade e variação do brilho das formulações C₂₀ e S₁₀, percebe-se que a formulação S₁₀ tende a ter maior intensidade de brilho em todas as temperaturas de queima, exceto a 850 °C, onde a diferença é mínima. A formulação C₂₀, por sua vez, apresenta maior variabilidade na intensidade do brilho em várias temperaturas, especialmente em 900, 1000, 1100 e 1200 °C. Em particular, a formulação S₁₀ mostra uma performance mais consistente com menor variabilidade em intensidades de brilho, exceto na temperatura de 1000 °C, onde a variabilidade é significativamente maior. A formulação S₁₀ também mantém uma alta intensidade de brilho em temperaturas mais elevadas, com menor desvio padrão a 1200 °C, indicando maior consistência. Em resumo, a formulação S₁₀ apresenta melhores características de brilho e maior estabilidade em comparação com a formulação C₂₀ nas temperaturas avaliadas.

6.3.3 Análise Colorimétrica

As variações de cores são expressas pelos parâmetros L*, a* e b*, dos corpos de prova em relação à temperatura de queima, à composição dos resíduos e aos percentuais destes nas formulações. À medida que a temperatura aumenta, observa-se uma transição na tonalidade da cor das amostras, conforme ilustra a Figura 56, passando de levemente bege/creme e alaranjada para um vermelho mais intenso, sendo evidente nas amostras de C₂₀ e S₁₀ cores mais acinzentadas e marrom com tendências a tons azulados nas temperaturas acima de 1100 °C.

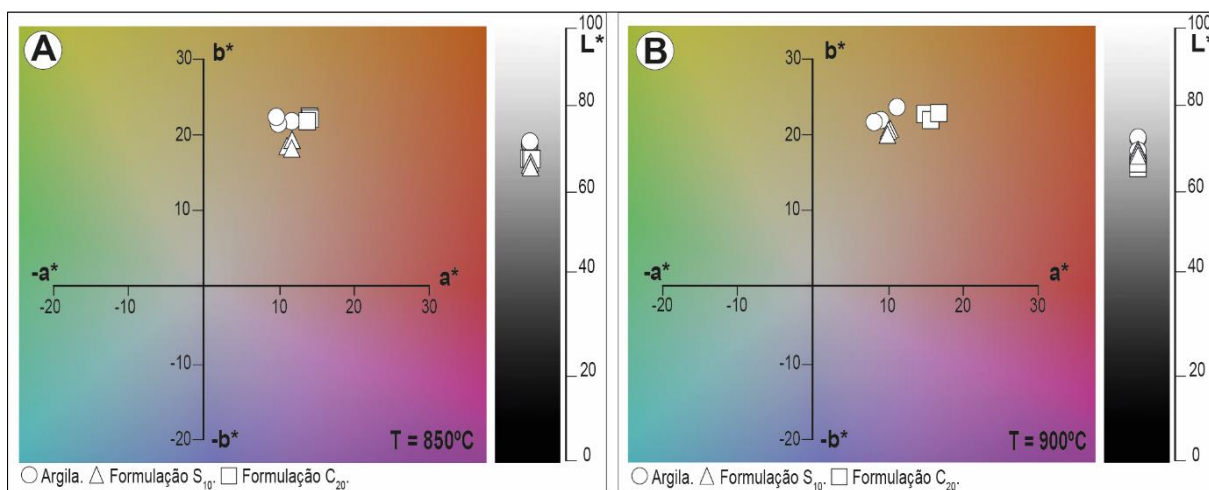
Figura 56 – Coloração dos corpos de prova após o processo de queima (temperaturas de queima: 850, 900, 950, 1000, 1100 e 1200 °C).



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados dos testes colorimétricos nas amostras de Argila (A) e nas formulações C₂₀ e S₁₀, revelam sutis diferenças nas características cromáticas quando submetidas a temperaturas de queima de 850 e 900 °C, conforme ilustrado na Figura 57.

Figura 57 – Análise cromática das amostras A, C₂₀ e S₁₀ no espaço colorimétrico CIELab (CIE, 1976). Após tratamento térmico a 850 °C em (A) e a 900 °C em (B).

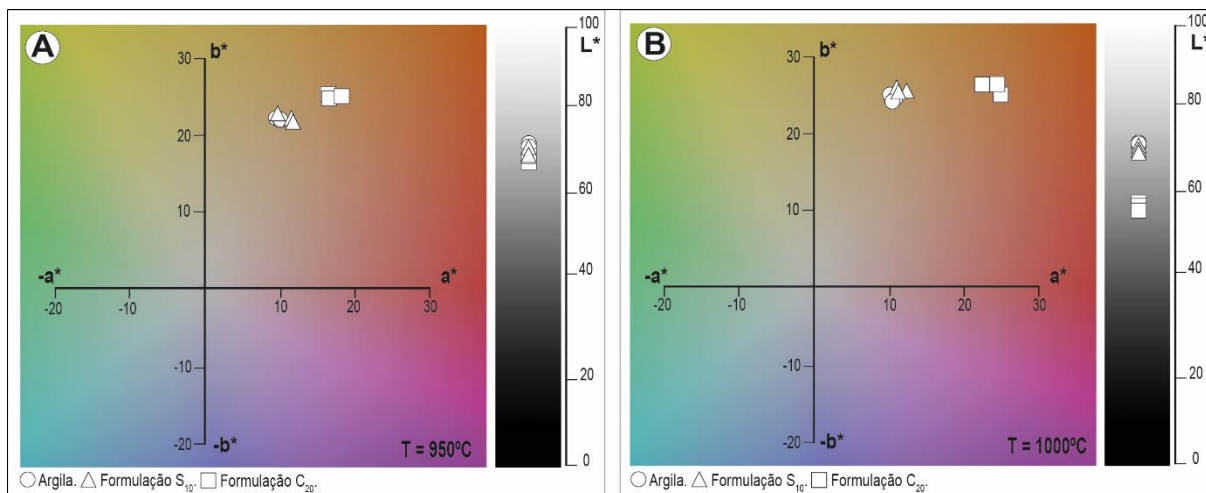


Fonte: Elaborado pela autora.

Comparando as cores das amostras nas temperaturas de queima de 850 e 900 °C, observa-se que a Argila, a 850 °C, apresentou valores intermediários de a* e b*, com alta luminosidade, enquanto a 900 °C houve uma redução no valor de a*, indicando menor intensidade de vermelho, mas com aumento na luminosidade. A formulação C₂₀, a 850 °C, mostrou valores mais altos de a*, sugerindo uma maior tendência ao vermelho e menor luminosidade, ao passo que a 900 °C houve um aumento em a*, intensificando o vermelho, com uma diminuição na luminosidade. Já a formulação S₁₀ a 850 °C apresentou menores valores de a* e b*, sugerindo uma cor menos intensa com luminosidade ligeiramente inferior, e a 900 °C manteve esses valores relativamente estáveis, com apenas uma leve variação na luminosidade.

A Figura 58 mostra as cores das amostras nas temperaturas de queima de 950 e 1000 °C. Percebe-se que a Argila a 950 °C apresentou valores de cor estáveis com ligeira variação na luminosidade, enquanto a 1000 °C houve um leve aumento em b*, indicando uma cor mais amarelada.

Figura 58 – Análise cromática das amostras A, C₂₀ e S₁₀ no espaço colorimétrico CIELab (CIE, 1976). Após tratamento térmico a 950 °C em (A) e a 1000 °C em (B).

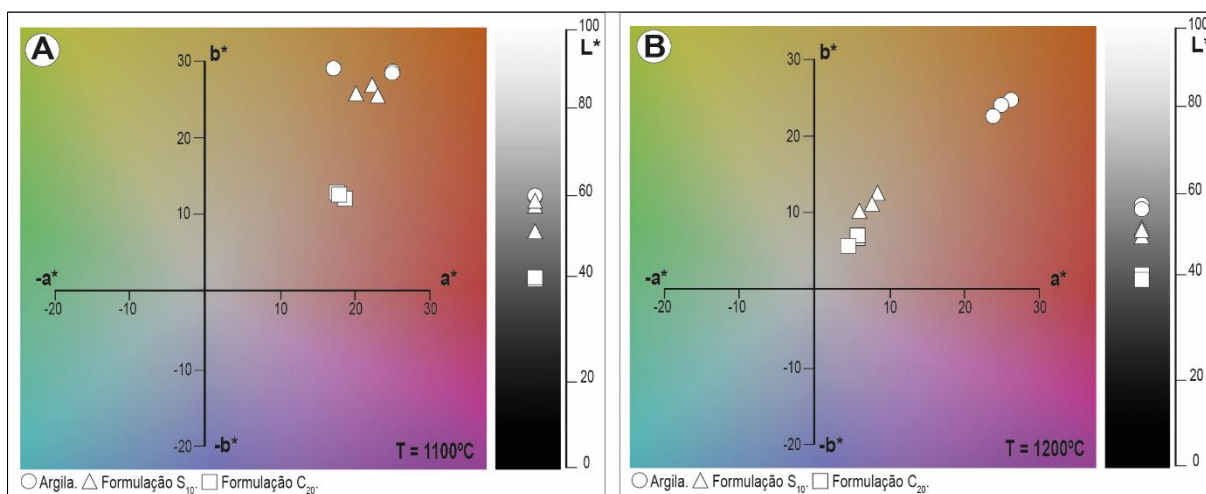


Fonte: Elaborado pela autora.

A formulação C₂₀ a 950 °C mostrou um aumento contínuo em a* e b*, sugerindo uma cor mais vermelha e laranja, enquanto na 1000 °C apresentou valores de a* e b* significativamente altos, com uma notável redução na luminosidade. A formulação S₁₀ a 950 °C apresentou valores intermediários com leve aumento em a*, enquanto a 1000 °C mostrou um aumento contínuo em a* e b*, mantendo valores de L* estáveis.

A variação cromática das amostras nas temperaturas de queima de 1100 e 1200 °C são exibidas na Figura 59.

Figura 59 - Análise cromática das amostras A, C₂₀ e S₁₀ no espaço colorimétrico CIELab (CIE, 1976). Após tratamento térmico a 1100 °C em (A) e a 1200 °C em (B).



Fonte: Elaborado pela autora.

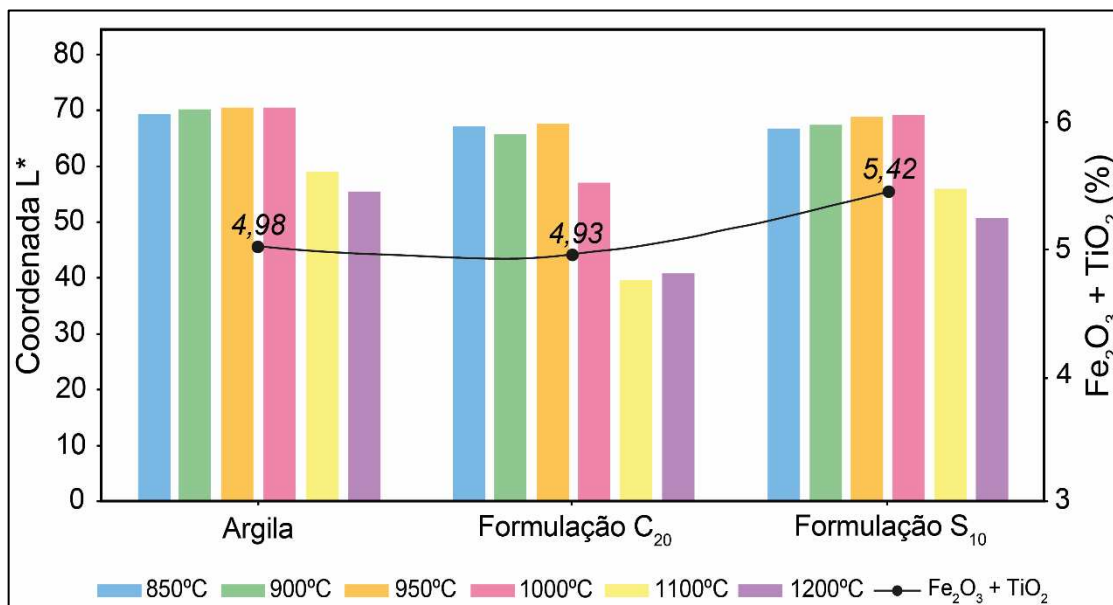
Verifica-se que a 1100 °C a Argila apresentou aumentos significativos em a^* e b^* com uma notável redução na luminosidade. Na temperatura de 1200 °C os valores de a^* e b^* mantiveram-se altos com uma leve redução na luminosidade. A formulação C₂₀ a 1100 °C mostrou uma mudança significativa em b^* , indicando uma cor com tendência mais azulada e uma grande redução na luminosidade; enquanto a 1200 °C observou-se os menores valores de a^* e b^* , com a menor luminosidade entre as amostras. Na formulação S₁₀ a 1100 °C os valores altos de a^* e b^* mantiveram-se altos com uma redução moderada na luminosidade; enquanto a 1200 °C esses valores ficaram intermediários, com uma luminosidade moderada.

Nas Figuras 56, 57, 58 e 59 efetuou-se a quantificação da análise visual da coloração dos corpos de prova, estabelecendo uma correlação com as variações das coordenadas a^* e b^* . Observa-se que os corpos de prova da argila e da formulação S₁₀, com teores de resíduo de 0 % e 10 %, respectivamente, demonstram uma tendência gradual na mudança de cor em resposta às temperaturas de queima. Entretanto, quando expostos a temperaturas superiores a 1000 °C, seu comportamento assemelha-se notavelmente ao das amostras da formulação C₂₀, que possui 20 % de resíduo.

Conforme indicado por Roveri *et al.* (2007), amostras com aproximadamente 4 % de FeO apresentam esse comportamento apenas em temperaturas acima de 1000 °C, quando há a liberação de ferro bivalente. Este último, por meio de um processo de oxidação, transforma-se em ferro trivalente, conferindo a coloração vermelha. À medida que as temperaturas ultrapassam 1000 °C, ocorre uma super queima, iniciando-se um processo de redução do ferro trivalente, resultando em uma tonalidade que varia de marrom avermelhado escuro a preto. No entanto, é relevante destacar que as variações de cor nos corpos de prova analisados neste estudo foram identificadas na faixa de 850 a 1200 °C, considerando a presença de teores de Fe₂O₃ + TiO₂ na ordem de 4,98 % para a argila, 4,93 % para a formulação C₂₀ e 5,42 % para a formulação S₁₀.

A fim de quantificar a análise visual realizada, foi medida a cor dos corpos de prova e relacionada à temperatura de queima e à concentração dos óxidos de ferro e titânio; conforme ilustrado na Figura 60.

Figura 60 – Variação do parâmetro L^* em função do percentual dos óxidos de $Fe_2O_3 + TiO_2$ e da temperatura.

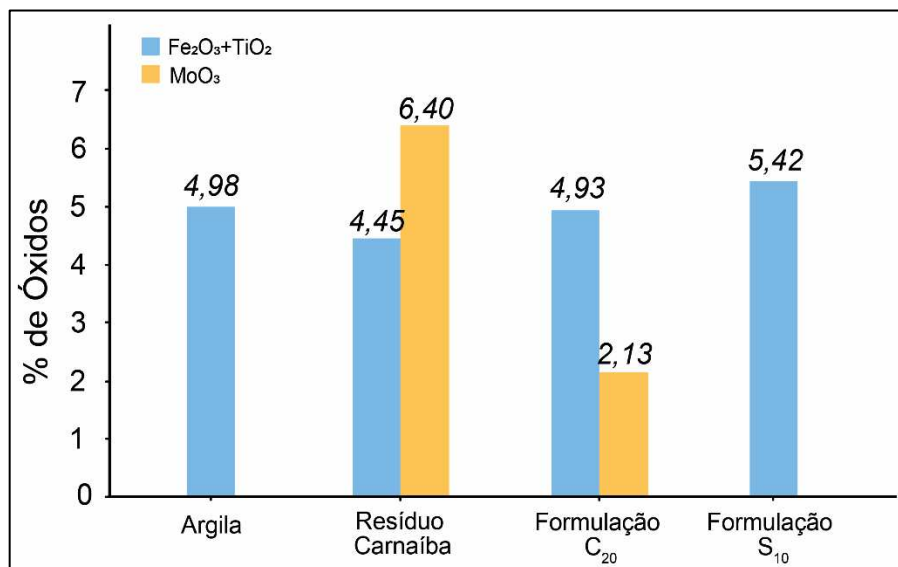


Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando a Figura 60 percebe-se que nas formulações A e S_{10} , nas temperaturas de 850 e 1000 °C, é perceptível uma inclinação da cor do material em direção ao tom creme-amarelado, acompanhada de um aumento progressivo na luminosidade (L^*). Na medida que as temperaturas ultrapassam 1000 °C, a coloração do material transita para tons que variam de laranja-avermelhado a marrom, caracterizando uma diminuição na luminosidade. No caso da formulação C_{20} observa-se que, nas temperaturas de 850 e 950 °C, a coloração dos corpos de prova tende a adquirir uma tonalidade vermelha, associada a um incremento na luminosidade conforme a temperatura aumenta. Contudo, para temperaturas superiores a 950 °C, a cor do material passa a mostrar uma inclinação em direção ao marrom-avermelhado escuro e/ou cinza escuro-azulado-preto, acompanhada por uma diminuição na luminosidade.

Estas alterações na coloração aparentemente decorrem do aumento nos teores de $Fe_2O_3 + TiO_2$, podendo também ser influenciadas pelo óxido de Mo, como no caso da formulação C_{20} . Vale ressaltar que nesta ocorre a maior redução da luminosidade com o aumento da temperatura. No entanto, é importante destacar que essa formulação não apresenta os maiores teores de $Fe_2O_3 + TiO_2$, o que pode ser justificado pela presença significativa de óxido de Mo; como apresentado na Figura 61.

Figura 61 – Variação de quantidade de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ e MoO_3 nas amostras estudadas.



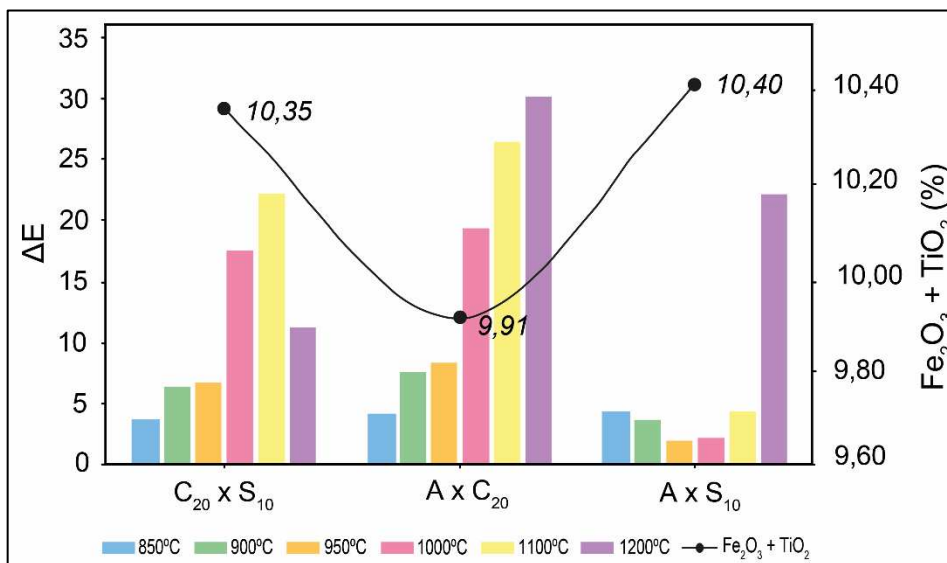
Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se que a amostra do resíduo de Carnaíba (C) e a formulação C₂₀ apresenta concentrações significativas de MoO_3 , o que pode ter impacto na coloração e atuar como agente redutor nas massas cerâmicas, conforme observado por Pereira *et al.* (2013). Em termos colorimétricos, o óxido de molibdênio (MoO_3) possui a capacidade de conferir uma variedade de cores a materiais cerâmicos, dependendo das condições específicas de queima. Em temperaturas elevadas, o óxido de molibdênio pode interagir com outros elementos na cerâmica participando de reações que resultam em distintas colorações, tais como tons azulados, marrons, acinzentados ou pretos; conforme evidenciado nos corpos de prova da Figura 56.

A análise da variação total da cor (ΔE) foram realizadas na argila (A) e nas formulações C₂₀ e S₁₀ utilizando a Equação (7) para calcular as alterações nas coordenadas L* (ΔL^*), a* (Δa^*) e b* (Δb^*). Esses cálculos permitem comparar os valores entre as diferentes amostras sob distintas condições de temperatura.

Na Figura 62, observamos que as variações mais significativas de cor são evidentes nas amostras com menor teor de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, porém com maior teor de MoO_3 , especialmente em condições de queima em temperaturas em torno de 1000 e 1200 °C.

Figura 62 – Variação total da cor (ΔE) em função do percentual de óxidos de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ e da temperatura.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nesse contexto, é possível enfatizar que as variações de cor nas amostras estudadas, em diferentes temperaturas de queima, não estão apenas relacionadas aos teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, mas também apresentam influência significativa do MoO_3 . Essa constatação destaca a importância do óxido de molibdênio como um fator determinante nas alterações cromáticas observadas nos corpos de provas da formulação C_{20} , proporcionando uma compreensão mais abrangente e detalhada dos resultados obtidos.

6.4 Conclusões

A incorporação de resíduos da exploração de esmeraldas provenientes dos garimpos de Carnaíba e Socotó em massa cerâmica apresentou resultados promissores, evidenciando o potencial desses resíduos na fabricação de materiais cerâmicos. As análises químicas das matérias-primas mostraram que tanto os resíduos quanto a argila contêm altos teores de óxidos de silício (SiO_2) e alumínio (Al_2O_3), essenciais para a formação de fases cerâmicas estáveis. A presença de óxidos fundentes (K_2O , Na_2O , CaO e MgO) em concentrações significativas nas amostras dos resíduos é particularmente relevante, pois favorece a difusão e a formação da fase líquida necessária para a síntese da mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$).

O resíduo de Socotó (S) destaca-se pela maior relação alumina/sílica (4,85) em comparação com a argila (2,09), o que é um parâmetro importante para a obtenção da mulita.

Além disso, a maior quantidade de Fe_2O_3 presente na matéria-prima S (8,70 %) influenciou diretamente na obtenção da coloração avermelhada nas amostras da formulação S_{10} após a queima; sendo uma característica desejável em cerâmicas vermelhas.

As análises térmicas revelaram que os resíduos e a argila passam por várias transformações mineralógicas significativas ao serem aquecidos, com a formação de metacaulinita a partir de caulinita e a subsequente recristalização em mulita e cristobalita nas temperaturas mais elevadas. A formação de powellita (CaMoO_4) na formulação C_{20} a 900 e 1000 °C indica que as condições de temperatura e a presença de molibdênio (MoO_3) favorecem a criação de novas fases estáveis.

A análise da intensidade do brilho demonstrou que a argila (A) apresentou uma maior intensidade de brilho e menor variação em comparação com as formulações C_{20} e S_{10} . No entanto, a formulação S_{10} mostrou uma menor variabilidade na intensidade do brilho em várias temperaturas de queima, sugerindo uma maior consistência em suas propriedades ópticas.

A análise de cor revelou que a argila (A) apresentou um valor L^* (luminosidade) de 69,4, a formulação C_{20} um valor L^* de 64,8; enquanto a formulação S_{10} um valor L^* de 68,3. Esses resultados indicam que a formulação S_{10} tem uma coloração final após queima que é comparável à da argila pura, mas com menor intensidade de brilho.

As características observadas nas massas cerâmicas produzidas com a incorporação de resíduos de esmeralda demonstram que as mesmas são ideais para o setor de cerâmica vermelha e cerâmica de revestimento. A coloração avermelhada, a estabilidade térmica e as propriedades ópticas consistentes tornam esses materiais especialmente adequados para aplicações onde a estética e a durabilidade são fundamentais. Dentre as formulações estudadas, a formulação S_{10} destacou-se como a mais promissora devido à sua maior consistência nas propriedades térmicas e ópticas.

Em suma, a incorporação de resíduos de esmeralda na massa cerâmica não só oferece uma solução sustentável para a gestão desses resíduos, mas também melhora as propriedades das cerâmicas produzidas. No entanto, é importante destacar que ensaios físico-mecânicos são necessários para assegurar que o produto final esteja em conformidade com todas as especificações técnicas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC) pelo apoio e suporte financeiro para a atividade de campo. Ao Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (CRTI) pelo suporte técnico e realização das análises; Ao grupo de pesquisa Automação, Eficiência Energética e Produção do IFBA (GPAEEP) pelo apoio e suporte técnico, e; ao Laboratório de Degradação e Estabilização e Compostos (LabDEC) da Universidade de Brasília (UnB) pelo suporte no desenvolvimento nos ensaios tecnológicos.

REFERÊNCIAS

- ACEVEDO, Nancy Isabel Álvarez; ROCHA, Marisa; BERTOLINO, Luiz Carlos. Mineralogical characterization of natural clays from Brazilian Southeast region for industrial applications. *Cerâmica*, v. 63, n. 366, p. 253-262, 2017. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/317133042>. Acesso em: 26 ago. 2024.
- AMORIM, Luciana Vieira *et al.* Bentotites from Boa Vista, Brazil: physical mineralogical and rheological properties. *Materials Research*, v. 7, n. 4, p. 583-593, 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/250029724>. Acesso em: 26 ago. 2024.
- BARBA, Ana *et al.* Matérias primas para a fabricação de suportes para baldosas cerâmicas. *In: QUALICER*, 1997, Castellón. *Anais [...]*. Castellón: Qualicer, 1997.
- BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Caracterização e beneficiamento da molibdenita da região de Campo Formoso – BA**. 2013. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2013.tde-26062014-215632>. Acesso em: 26 ago. 2024.
- BRINDLEY, George William; BROWN, Gordon. **Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification**. Mineralogical Society, 1980.
- BRITO, Igor *et al.* Avaliação de novos depósitos de argilas do Estado da Paraíba visando sua aplicação como matérias-primas cerâmicas. *Cerâmica*, v. 61, n. 360, p. 391-398, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613601926>. Acesso em: 26 ago. 2024.
- CIELAB - COMMISSION INTERNATIONALE DE ECLAIRAGE (CIE). Recommendations on uniform color spaces, color difference equations, psychometric color terms. Supplement 2 to CIE publication 15. **Colorimetry Bureau Central de la CIE**, Paris, 1976.
- DUTRA, Renato *et al.* Estudo da variação da tonalidade de materiais cerâmicos tradicionais. Parte-III: Efeito da composição química das argilas. *In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA*, 21., 2005, Rio de Janeiro. *Anais [...]*. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. p. 388-394.

FEITOSA, Ana *et al.* Análise da cor de peças cerâmicas de revestimento submetidas a diferentes condições de processamento. *In: 57º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA*, 57., 2013, João Pessoa. **Anais** [...]. João Pessoa: ABCERAM, 2013. p. 1874-1885.

HAYASHI, Shigeo; TAKANO, Masahide; KIKKAWA, Shigeharu. Magnetic and electrical properties of pyrochlore-type RE₂Ti₂O₇ (RE=rare earth) single crystals. **American Mineralogist**, v. 84, n. 10, p. 1635-1642, 1999.

IRVINE, John; MURPHY, Richard. **Ceramic materials: Science and engineering**. Springer, 2018.

KANG, Suk-Joong. **Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure**. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/259781835>. Acesso em: 26 ago. 2024.

KUMAR, Manoj; PATEL, Ashutosh. **Modern ceramic engineering: Advances in processing, characterization, and applications**. CRC Press, 2022.

LUZ, Adão Benvindo; LINS, Fernando Antônio Freitas. **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. CETEM/MCT, 2005. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/522>. Acesso em: 26 ago. 2024.

MACEDO, Ronaldo *et al.* Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 54, p. 411-417, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-9132008000400005>. Acesso em: 26 ago. 2024.

MAIA, Luiz *et al.* Caracterização Térmica de argilas da cidade de Costa Rica no Estado de Mato Grosso do Sul. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA*, 44., 2000, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ABCERAM, 2000. p. 06101-06110.

MENSHAZ, Abdullah; JOHARI, Megat; AHMAD, Zainal. Characterization of metakaolin treated at different calcination temperatures. **AIP Conference Proceeding**, v. 1892, n. 1, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5005659>. Acesso em: 26 ago. 2024.

MOORE, Duane; REYNOLDS, Robert. **X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 1997.

MOTTA, José *et al.* As matérias-primas cerâmicas. Parte II: Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional. **Revista Cerâmica Industrial**, v. 7, n. 1, p. 33-40, 2002.

OLIVEIRA, Antônio; HOTZA, Dachamir. **Tecnologia de Fabricação de Revestimentos Cerâmicos**. 2ª Ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2011.

PEREIRA, Paulo; ANDRADE, Carlos; MONTANARI, Ernesto. Adsorção de molibdato em minerais de argilas naturais e modificadas com ácido sulfúrico, ácido húmico e uréia. **Cerâmica**, v. 59, p. 170-180, 2013.

PRADO, Carolina Mangieri de Oliveira. **Caracterização Química e Mineralógica das Argilas Utilizadas na Produção de Cerâmica Vermelha no Estado de Sergipe**. 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Núcleo de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/6126>. Acesso em: 26 ago. 2024.

ROVERI, Carolina; ZANARDO, Antenor; MORENO, Márcia. Variação da cor e propriedades cerâmicas com o aumento da temperatura de queima de uma argila proveniente da Formação Corumbataí, região de Piracicaba, SP. **Revista Cerâmica**, v. 53, n. 328, p. 436-441, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/250982471>. Acesso em: 26 ago. 2024.

SANTOS, Pérsio de Souza. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1989.

SANTOS, Samara *et al.* Estudo cinético do processo de desidroxilação da caulinita. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 57., 2013, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: ABCERAM, 2013. p. 1775-1787.

SCHNEIDER, Hans; SCHREUER, Jörg; HILDMANN, Bernhard. Structure and properties of mullite - A review. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 28, n. 2, p. 329-344, 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/223890648>. Acesso em: 26 ago. 2024.

SCHROEDER, Carlos; KALIDINDI, Suresh. **High-performance ceramic materials: Advances in processing and applications**. Wiley, 2023.

SILVA, Laís *et al.* Caracterização Química e Mineralógica de Argilas Utilizadas para a Produção de Cerâmica Vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 20, n. 4, p. 30-35, 2015.

SMITH, Matthew; PARKER, Stephen. Synthesis of CaMoO_4 via precipitation from molten Na_2MoO_4 . **Materials Chemistry and Physics**, v. 127, n. 1-2, p. 97-103, 2011.

SOKHANVAR, Saeed; SADEGHI, Mohammad. **Advances in ceramics: synthesis, processing, and applications**. Oxford: Elsevier, 2020.

SOUZA, Ana Carolina Santos de. **Produção de molibdênio metálico a partir da molibdenita de Carnaíba (Bahia)**. 2014. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014. Disponível em: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/16990>. Acesso em: 26 ago. 2024.

TEIXEIRA, André *et al.* Influência dos tipos de matérias-primas e das condições de queima na cor do suporte cerâmico. **Revista Técnico Científica (IFSC)**, v. 3, n. 1, p. 45-52, 2012.

VIEIRA, Carlos *et al.* Incorporação de lama de alto forno em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 53, p. 381-387, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/240971747>. Acesso em: 26 ago. 2024.

XU, Ruian *et al.* **Chemistry of zeolites and related porous materials: synthesis and structure**. Chichester: John Wiley & Sons (Asia) Pte. Ltd., 2007. ISBN 978-0-470-82233-3. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281721463>. Acesso em: 26 ago. 2024.

YIN, Qingrui; ZHU, Binghe; ZENG, Huarong. **Microstructure, property and processing of functional ceramics**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 Conclusões

A presente pesquisa explorou de forma abrangente o potencial da incorporação de resíduos da exploração de esmeraldas em massas cerâmicas, tanto para a produção de cerâmica vermelha quanto de revestimentos cerâmicos de alto desempenho. Os resultados obtidos fornecem um conjunto de conclusões significativas sobre as propriedades mineralógicas, térmicas, físicas e ópticas dos materiais estudados, destacando seu potencial para uso na indústria ceramista e civil, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental.

A argila de Umbuzeiro apresentou características mineralógicas e químicas favoráveis para diversas aplicações cerâmicas. A difração de raios - X revelou uma composição predominante de quartzo, caulinita, muscovita e microclínio nas amostras naturais, com transformações significativas após tratamento térmico, resultando na formação de metacaulinita, mulita e cristobalita em temperaturas superiores a 1000 °C. Essas transformações foram acompanhadas por uma densa sinterização das peças, especialmente entre 950 e 1200 °C, o que resultou em uma microestrutura compacta e propriedades mecânicas superiores.

Os ensaios térmicos indicaram que, a partir de 1000 °C, houve uma expressiva redução na absorção de água, atingindo valores inferiores a 3 % a 1100 °C. Essa redução, juntamente com o aumento da resistência mecânica, tornou a argila de Umbuzeiro adequada para a produção de porcelanatos, em conformidade com as normas ISO 13006 e ABNT NBR 13818. Além disso, em temperaturas mais baixas (850 a 1000 °C), a argila mostrou propriedades apropriadas para a fabricação de blocos e telhas cerâmicas, atendendo aos requisitos da norma ABNT NBR 15270.

A incorporação de resíduos de esmeralda provenientes dos garimpos de Socotó e Carnaíba demonstrou resultados promissores, especialmente nas formulações que continham entre 10 % e 20 % de resíduo, respectivamente. Nesses casos, houve uma sinterização mais eficiente e a formação de fases minerais de alta temperatura, como mulita e indialita, que são essenciais para a resistência térmica e mecânica das cerâmicas. A presença de óxidos fundentes, em especial no resíduo de Socotó, contribuiu para a formação de uma fase líquida em temperaturas elevadas, promovendo a compactação das partículas e a redução da porosidade das peças.

Os ensaios de retração linear e absorção de água mostraram que as formulações com resíduos de esmeralda apresentaram progressiva sinterização com o aumento da temperatura de queima. As formulações C₂₀ e S₁₀ atingiram absorção de água inferior a 10 % em temperaturas de 1000 a 1100 °C, tornando-as adequadas para revestimentos cerâmicos de alto desempenho. A formulação C₂₀, em particular, destacou-se por sua estabilidade térmica e resistência mecânica a 1200 °C, sendo indicada para revestimentos e pisos de alta durabilidade. Já a formulação S₁₀ revelou-se promissora para a produção de materiais cerâmicos avançados, com elevadas resistência e estabilidade térmica, adequados para aplicações estruturais e revestimentos de alta performance.

Além disso, as formulações C₂₀ e S₁₀ também mostraram-se eficazes para a produção de cerâmica vermelha em temperaturas mais baixas, com alta porosidade e absorção de água superior a 15% entre 850 e 900 °C, atendendo às normas ABNT NBR 15310 e ABNT NBR 15270. Esses resultados demonstram a versatilidade dos materiais estudados, podendo ser aplicados tanto para produtos de alto desempenho quanto para blocos e telhas cerâmicas.

No que diz respeito às propriedades ópticas, as peças cerâmicas com resíduos de esmeralda apresentaram resultados significativos. A formulação S₁₀, em especial, adquiriu uma coloração avermelhada após a queima, devido ao alto teor de óxido de ferro (Fe₂O₃) no resíduo de Socotó, característica desejável em cerâmicas vermelhas. As análises térmicas revelaram que a formação de fases minerais, como mulita e powellita, desempenhou um papel importante na estabilidade térmica e resistência das peças cerâmicas, especialmente na formulação C₂₀.

A molibdenita presente na formulação C₂₀ contribuiu diretamente para a formação da fase powellita (CaMoO₄) durante o tratamento térmico, observada nas temperaturas de 900 e 1000 °C. No entanto, sua presença não mostrou melhorias significativas nas propriedades mecânicas ou de sinterização da massa cerâmica, sugerindo que, embora a molibdenita tenha participado da formação de novas fases, ela não foi determinante para o desempenho geral da cerâmica.

Quanto ao brilho, a formulação S₁₀ destacou-se por sua consistência ao longo das temperaturas de queima, sugerindo sua adequação para revestimentos cerâmicos que exigem durabilidade estética.

A incorporação de resíduos de esmeralda nas massas cerâmicas representa uma solução sustentável para a gestão desses resíduos, que atualmente são descartados de forma inadequada, gerando impactos ambientais significativos. A reutilização desses materiais não

apenas reduz esses impactos, mas também melhora as propriedades das peças cerâmicas resultantes, contribuindo para uma produção mais sustentável no setor cerâmico.

Conclui-se, portanto, que a incorporação de 10% (formulação S₁₀) e 20% (Formulação C₂₀) de resíduo de esmeralda em formulações cerâmicas é a mais adequada para alcançar as propriedades físicas, mecânicas e ópticas desejadas. Entretanto, formulações com teores superiores a 20% ainda requerem otimizações adicionais.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com base nos resultados obtidos, sugerem-se as seguintes linhas de pesquisa para estudos futuros:

- **Otimização das formulações com teores superiores a 20% de resíduo de esmeralda:** Estudos adicionais são necessários para reavaliar o comportamento físico e mecânico dessas formulações, especialmente em temperaturas de queima elevadas. O objetivo é evitar a formação de trincas e a redução da resistência observadas em algumas amostras com maiores teores de resíduo.
- **Ensaio em escala semi-industrial:** Para validar os resultados laboratoriais, é recomendada a realização de testes em escala industrial, incluindo a produção de lotes maiores de materiais cerâmicos com incorporação de resíduo de esmeralda. Esses ensaios devem incluir a avaliação da durabilidade e desempenho dos produtos finais em condições reais.
- **Exploração de outras propriedades tecnológicas:** Estudos mais aprofundados sobre as propriedades termoacústicas e de resistência ao desgaste das cerâmicas com resíduos de esmeralda devem ser realizados, a fim de avaliar seu potencial para aplicações industriais mais amplas.
- **Análises ambientais detalhadas:** Investigar o ciclo de vida completo das cerâmicas produzidas com resíduos de esmeralda, desde a extração até sua disposição final, garantindo que o processo de reutilização seja ambientalmente vantajoso.

Essas abordagens têm o potencial de expandir o uso dos resíduos de esmeralda, promovendo inovação e sustentabilidade na indústria cerâmica.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13818**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13818**: Placas cerâmicas para revestimento: especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270**: Componentes cerâmicos: blocos e telhas cerâmicos para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos: Requisitos para blocos e telhas cerâmicos para alvenaria. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15310**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15310**: Placas cerâmicas - Determinação da resistência ao risco. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10545-3**: Placas Cerâmicas – Parte 3: Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10545-4**: Placas Cerâmicas – Parte 4: Determinação da carga de ruptura e módulo de resistência à flexão. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos – Parte 2: Blocos e tijolos para alvenaria – método de ensaio. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro - RJ: ABNT, 2016.

ACEVEDO, Nancy Isabel Álvarez; ROCHA, Marisa; BERTOLINO, Luiz Carlos. Mineralogical characterization of natural clays from Brazilian Southeast region for industrial applications. **Cerâmica**, v. 63, n. 366, p. 253-262, 2017. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/317133042>. Acesso em: 26 ago. 2024.

ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, n. 4, 1977.

ALMEIDA, Fernando *et al.* Granitic rocks of Northeast South America. *In*: INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SCIENCES, 1967, Recife. **Anais [...]**. Recife: IUGS/UNESCO, 1967.

AMORIM, Luciana Vieira *et al.* Bentotites from Boa Vista, Brazil: physical mineralogical and rheological properties. **Materials Research**, v. 7, n. 4, p. 583-593, 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/250029724>. Acesso em: 26 ago. 2024.

ANHAEUSSER, Carl Ronald. Archean Metallogeny in Southern Africa. **Economic Geology**, v. 71, n. 1, p. 16-43, 1976.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. 2023. **Extração de Argila no baixo Jaguaribe – CEARÁ**. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnmp/publicacoes-economiamineral/arquivos/extracao-de-argila-no-baixo-jaguaribe-ceara/view>. Acesso em: 13 de out. de 2023.

ASCOMA/SDE - SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. 2020. **Líder na produção de oito minérios, Bahia tem nova província mineral na região Norte**. Disponível em: <http://www.bahia.ba.gov.br/noticias/lider-producao-de-oito-minerios-bahia-tem-nova-provincia-mineral-na-regiao-norte/>. Acesso em: 11/10/2023.

BABISK, Michelle *et al.* Incorporation of quartzite waste in red ceramic. **HOLOS**, v. 28, n. 6, p. 169, 2012.

BAIN, John Alexander; HIGHLEY, David Ernest. Kaolin: Genesis and utilization. **Mineralogical Society of London**, Special Publication, n. 12, p. 165-176, 1978.

BARBA, Ana *et al.* Matérias primas para a fabricação de suportes para baldosas cerâmicas. *In*: QUALICER, 1997, Castellón. **Anais [...]**. Castellón: Qualicer, 1997.

BARBOSA, Johildo; CRUZ, Simone; SOUZA, Jailma. Terrenos Metamórficos do embasamento. *In*: BARBOSA, Johildo. (Coord.). **Geologia da Bahia: pesquisa e atualização**. Salvador: CBPM. v.1, p.101-201, 2012.

BARBOSA, Johildo; SABATÉ, Pierre. Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil: geodynamic features. **Precambrian Research**, v. 133, p. 1-27. 2004.

BARBOSA, Johildo; SABATÉ, Pierre; MARINHO, Moacyr. O Cráton do São Francisco na Bahia: uma síntese. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 1, p. 3-6, 2003.

BARBUENA, Danilo. **Geoquímica e Geocronologia das rochas supracrustais do Greenstone Belt de Mundo Novo, Bahia: Evidências de uma bacia de Back-Arc na transição entre o Mesoarqueano e o Neoarqueano**. 2017. 174 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

BARSOUM, Michel. **Fundamentals of ceramics**. CRC Press, 2019.

BLASKOWSKI, Alessandra *et al.* Prospecção de agrominerais na região de Irecê e Jaguarari - Bahia: uma proposta de metodologia para mapeamento agrogeológico. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 48., 2016, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: SBG, 2016.

BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Caracterização e beneficiamento da molibdenita da região de Campo Formoso – BA**. 2013. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2013.tde-26062014-215632>. Acesso em: 26 ago. 2024.

BRASIL. **Decreto-Lei no 227**, de 28 de fevereiro de 1967. Presidência da República Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. Poder Executivo, Brasília, DF, 28 fevereiro. 1967.

BRINDLEY, George William; BROWN, Gordon. **Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification**. Mineralogical Society, 1980.

BRITO NEVES, Benjamim Bley de; CORDANI, Umberto; TORQUATO, Joaquim. Evolução geocronológica do Pré-cambriano no estado da Bahia. **Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia**, v. 3, p. 1-101, 1980.

BRITO, Igor *et al.* Avaliação de novos depósitos de argilas do Estado da Paraíba visando sua aplicação como matérias-primas cerâmicas. **Cerâmica**, v. 61, n. 360, p. 391-398, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613601926>. Acesso em: 26 ago. 2024.

BURCH, Robert. Preparation of high surface area reduced molybdenum oxide catalyst. **Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases**, v. 74, p. 2982-2990, 1978. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/F19787402982>. Acesso em: 26 ago. 2024.

CAMPOS, L. F. A. *et al.* Características de plasticidade de argilas para uso em cerâmica vermelha ou estrutural. **Cerâmica**, São Paulo, v. 45 (295), 1999.

CAVALCANTE, Ronaldo Fonseca. **Estudo do potencial de utilização do resíduo da extração de esmeraldas na fabricação de cerâmica de revestimento**. 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

CAVALCANTE, Ronaldo *et al.* Utilização do resíduo da extração de esmeraldas em uma formulação de massa de revestimento cerâmico. **Cerâmica**, v. 58, p. 158-164. 2012.

CBPM - COMPANHIA BAIANA DE PESQUISA MINERAL. 2023. **Mineração Sustentável**. Disponível em: <http://www.cbpm.ba.gov.br/mineracao-e-sustentabilidade/>. Acesso em: 03 de jul. de 2024.

CEMPRE - COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Guia da coleta seletiva de lixo**. São Paulo, 2014.

CIELAB - Commission International de Eclairage (CIE). Recommendations on uniform color spaces, color difference equations, psychometric color terms. Supplement 2 to CIE publication 15. **Colorimetry Bureau Central de la CIE**, Paris, 1976.

CORDANI, Umberto Giuseppe. **Evolução Geocronológica Pré-Cambriana da Faixa Costeira do Brasil entre Salvador e Vitória**. 1973. 107 f. Tese (Livre-docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.

COSTA, Bruno Ferreira. **Caracterização geológica, petrográfica e litogeoquímica do granito de carnaíba: Potencial metalogenético para lítio**. 2019. 81 f. Monografia (Bacharel em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019.

COUTO, Pedro Antônio de Almeida. **Mapa Gemológico do Estado da Bahia: Texto Explicativo**. Salvador: CPRM, 2000.

COUTO, Pedro Antônio de Almeida *et al.* Projeto Serra de Jacobina: geologia e prospecção geoquímica. **Relatório final**. Salvador: CPRM, 1978.

COUTO, P. A. de A.; SILVA, E. A.; LIMA, R. Garimpos de esmeralda de Carnaíba e Socotó, Bahia. *In*: SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E. T.; COELHO, C. E. (Coords.) **Principais depósitos minerais do Brasil: gemas e rochas ornamentais**. Brasília: DNPM, v. 4, p. 259-269, 1991.

DANTAS, Elaine Cardozo. **(Re)Produção do espaço da mineração na Serra da Carnaíba: Um olhar geográfico para a comunidade da Carnaíba, Pindobaçu-BA**. 2022. 56 f. Monografia (Licenciatura em Geografia) – Colegiado de Geografia, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Senhor do Bonfim, 2022.

DARWEESH, Hassan. Building materials from siliceous clay and low grade dolomite rocks. **Ceramics International**, v. 27, n. 1, p. 45-50, 2001. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00040-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00040-7). Acesso em: 26 ago. 2024.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável do Distrito Federal**. Disponível em: <https://ods.df.gov.br/>. Acesso em: 25 out. 2024.

DUTRA, Renato *et al.* Estudo da variação da tonalidade de materiais cerâmicos tradicionais. Parte-III: Efeito da composição química das argilas. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 21., 2005, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: CETEM, 2005.

ELBOUKILI, Ghita *et al.* Mineralogical, physico-chemical and technological characterization of clay from Bensmim (Morocco): Suitability for building application. **Construction and Building Materials**, v. 280, n. 5, p. 122300, 2021.

ELKINGTON, John. **Canibais com garfo e faca**. São Paulo: M.Books, 2011.

FEITOSA, Ana *et al.* Análise da cor de peças cerâmicas de revestimento submetidas a diferentes condições de processamento. *In: 57º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA*, 57., 2013, Natal. **Anais [...]**. Natal: ABCERAM, 2013. p. 1874-1885.

GRIFFON, J. C.; KREMER, M. R.; MISI, A. Estudo estrutural e genético da jazida de esmeralda de Carnaíba (Bahia). **Academia Brasileira de Ciências**, v. 39, n. 4, 1967.

HAYASHI, Shigeo; TAKANO, Masahide; KIKKAWA, Shigeharu. Magnetic and electrical properties of pyrochlore-type RE₂Ti₂O₇ (RE=rare earth) single crystals. **American Mineralogist**, v. 84, n. 10, p. 1635-1642, 1999.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Definições e Conceitos**. Página inicial. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/>>. Acesso em: 13 de out. de 2023.

IRVINE, John; MURPHY, Richard. **Ceramic materials: Science and engineering**. Springer, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10545-4**: Ceramic tiles – Part 4: Determination of modulus of rupture and breaking strength. Geneva: ISO, 2020.

INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13006**: Ceramic tiles – Definitions, classification, characteristics and marking. Geneva: ISO, 2018.

JUNIOR, Luiz *et al.* Influência das propriedades mineralógicas nas características tecnológicas de cerâmicas. **Cerâmica**, v. 58, n. 348, pág. 404-412, 2012.

KANG, Suk-Joong. **Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure**. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/259781835>. Acesso em: 26 ago. 2024.

KUMAR, Manoj; PATEL, Ashutosh. **Modern ceramic engineering: Advances in processing, characterization, and applications**. CRC Press, 2022.

KUMARI, Niharika; MOHAN, Chandrashekhar. Basics of clay minerals and their characteristic properties. **Clay Miner**, v. 24, n. 1, 2021.

LEDRU, Patrick *et al.* Markers of the last stages of the Palaeoproterozoic collision: evidence for a 2 Ga continent involving circum-South Atlantic provinces. **Precambrian Research**, v. 69, p. 169-191, 1994.

LEITE, Carlson *et al.* Evolução metamórfica/metassomática paleoproterozóica do Complexo Saúde, da Bacia Jacobina e de leucogranitos peraluminosos na parte norte do Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 4, p. 777-797, 2007.

LEO, Gerhard; COX, Dennis; CARVALHO, João Paulo. **Geologia da parte sul da Serra de Jacobina, Bahia, Brasil**. Rio de Janeiro: DNPM, 1964.

LODI, Paulo César. **Mecânica dos Solos**. 1ª Edição. Bauru: UNESP, 2000.

LUZ, Adão Benvindo; LINS, Fernando Antônio Freitas. **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. CETEM/MCT, 2005. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/522>. Acesso em: 26 ago. 2024.

MACEDO, Rose Meire Penha Revoredo de. **Aplicação da Metodologia de Planejamento de Experimentos para Formulação de Massas Cerâmicas para Telhas**. 2007. 117 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

MACEDO, Ronaldo *et al.* Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 54, p. 411-417, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-9132008000400005>. Acesso em: 26 ago. 2024.

MACHADO, Tércio Graciano. **Estudo da adição de resíduo de sheelita em matriz cerâmica: formulação, propriedades físicas e microestrutura**. 2012. 144 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

MAIA, Luiz *et al.* Caracterização Térmica de argilas da cidade de Costa Rica no Estado de Mato Grosso do Sul. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 44., 2000, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABCERAM, 2000. p. 06101-06110.

MANOHARAN, Chellasamy *et al.* Analysis of temperature effect on ceramic brick production from alluvial deposits, Tamilnadu, India. **Applied Clay Science**, v. 54, n. 1, p. 20-25, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2011.07.002>. Acesso em: 22 ago. 2024.

MASCARENHAS, Juracy *et al.* Geologia e recursos minerais do Grupo Jacobina e da parte sul do Greenstone Belt de Mundo Novo. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, Salvador. **Série Arquivos Abertos**, v. 13, p. 58, 1998.

MASCARENHAS, Juracy de Freitas; SILVA, Ernesto Fernando Alves da. “Greenstone Belt” de Mundo Novo: caracterização e implicações metalogenéticas e geotectônicas no Cráton de São Francisco. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, Salvador. **Série Arquivos Abertos**, v. 5, 1994.

MECHI, Andréa; SANCHES, Djalma Luiz. The Environmental Impacto of Mining in the State of São Paulo. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010.

MELLO, Roberta Monteiro de. **Utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de mármore e granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha**. 2006. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MELO, Roberto Campelo de. **Pintadas, folha SC. 24-Y-D-V: Texto Explicativo**. Estado da Bahia. Brasília: DNPM/CPRM, 1991.

MELO, Roberto; LOUREIRO, Herman; PEREIRA, Luiz. **Serrinha: folha SC.24-Y-D**. Estado da Bahia. Brasília: CPRM/PLGB, 1995.

MENEZES, Renato *et al.* Estudo sobre as propriedades de cerâmicas vermelhas incorporadas com resíduos de quartzito. **Cerâmica**, v. 52, n. 321, 2006.

MENEZES, R. *et al.* Utilização de resíduos da serragem de granito na fabricação de blocos cerâmicos em escala piloto. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA*, 46., 2002, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: CD-ROM-ABCERAM, 2002.

MENSHAZ, Abdullah; JOHARI, Megat; AHMAD, Zainal. Characterization of metakaolin treated at different calcination temperatures. **AIP Conference Proceeding**, v. 1892, n. 1, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1063/1.5005659>. Acesso em: 26 ago. 2024.

MONTEIRO, Sergio; VIEIRA, Carlos. Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil. **Applied Clay Science**, v. 27, n. 3-4, p. 229-234, 2004.

MONTGOMERY, Douglas. **Design and Analysis of Experiments**. 5th Edition. New Jersey: John Wiley and Sons Ltd, 1991.

MOORE, Duane; REYNOLDS, Robert. **X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals**. 2^a Edition. Oxford: Oxford University Press, 1997.

MOREIRA, Marcos Donadello; SILVA, Raymundo Wilson Santos. Esmeralda de Carnaíba, Bahia: geologia e desenvolvimento do garimpo. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, Salvador. **Série Arquivos Abertos**, v. 25, 2006.

MORENO, Márcia *et al.* Caracterização de argilas e composição de massas cerâmicas preparadas com base na análise de curvas de consistência de misturas argila-água. **Cerâmica**, v. 62, n. 361, p. 21-31, 2016.

MOTHÉ FILHO, Fabiano Heitor; POLIVANOV, Helena; MOTHÉ, Cheila. Reciclagem dos resíduos sólidos de rochas ornamentais. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 28, n. 2, p. 139-151, 2005.

MOTTA, José *et al.* As matérias-primas cerâmicas. Parte II: Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional. **Revista Cerâmica Industrial**, v. 7, n. 1, p. 33-40, 2002.

MOUGEOT, R. *et al.* Geochemical and mineralogical characterizations of sulphide associated to the Jacobina gold mineralizations Bahia, Brazil. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 39., 1996, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: SBG, 1996. p. 318-320.

OLIVEIRA, Antônio; HOTZA, Dachamir. **Tecnologia de Fabricação de Revestimentos Cerâmicos**. 2^a Ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2011.

OLIVEIRA, Eelson; MELLO, Edson; MCNAUGHTON, Neal. Reconnaissance U–Pb geochronology of early Precambrian quartzites from the Caldeirão belt and their basement, NE São Francisco Craton, Bahia, Brazil: implications for the early evolution of the Palaeoproterozoic Salvador-Curaçá Orogen. **Journal of South American Earth Science**, v. 15, p. 349–362, 2002.

PEREIRA, Paulo; ANDRADE, Carlos; MONTANARI, Ernesto. Adsorção de molibdato em minerais de argilas naturais e modificadas com ácido sulfúrico, ácido húmico e uréia. **Cerâmica**, v. 59, p. 170-180, 2013.

PEUCAT, Jean Jacques *et al.* 3.3 Ga SHRIMP U–Pb zircon age of a felsic metavolcanic rock from the Mundo Novo greenstone belt in the São Francisco Craton, Bahia (NE Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 15, p. 363-373, 2002.

PHILIPPI, Arlindo *et al.* Desenvolvimento sustentável, interdisciplinaridade e Ciências Ambientais. **Revista Brasileira de Pós-Graduação**, v. 10, n. 21, p. 509-533, 2014. Disponível em: <https://rbpg.capes.gov.br/index.php/rbpg/article/view/423/353>. Acesso em: 07 mai. 2024.

PRADO, Carolina Mangieri de Oliveira. **Caracterização Química e Mineralógica das Argilas Utilizadas na Produção de Cerâmica Vermelha no Estado de Sergipe**. 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Núcleo de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/6126>. Acesso em: 26 ago. 2024.

REED, James. **Principles of ceramics processing**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.

RIBEIRO NETO, Djalma Valério. **Efeito da utilização de Resíduos Sólidos de Rochas Ornamentais do Seridó Potiguar nas propriedades de argamassa autonivelante**. 2023. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.

ROCHA, Antônio José Dourado. **Morro do Chapéu folha SC.24-Y-C-V: Texto Explicativo**. Estado da Bahia. Brasília: CPRM/PLGB, 1993.

ROVERI, Carolina; ZANARDO, Antenor; MORENO, Márcia. Variação da cor e propriedades cerâmicas com o aumento da temperatura de queima de uma argila proveniente da Formação Corumbataí, região de Piracicaba, SP. **Revista Cerâmica**, v. 53, n. 328, p. 436-441, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/250982471>. Acesso em: 26 ago. 2024.

RUDOWSKI, Luc; GIULIANI, Gaston; SABATÉ, Pierre. The proterozoic granite massifs of Campo Formoso and Carnaíba (Bahia, Brasil) and their Be, Mo, W mineralizations. *In: International Symposium on Granites and Associated Mineralizations*, 1987, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: ISGAM, 1987. p. 253-257.

RUDOWSKY, Luc. **Pétrologie et géochimie des granites transamazoniens de Campo Formoso e Carnaíba (Bahia, Brésil), e les phlogopitites à émeraude associées**. 1989. 378 f. Tese (Doutorado), Université de Paris, Paris, 1989.

SABATÉ, Pierre *et al.* The 2 Ga peraluminous magmatism of the Jacobina–Contendas Mirante belts (Bahia-Brazil): geologic and isotopic constraints on the sources. **Chemical Geology**. v. 83, p. 325-338, 1990.

SAMPAIO, Antônio Rabelo *et al.* **Jacobina, folha SC.24-Y-C, Estado da Bahia**. Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT, 2001.

SANTANA, Antônio de Jesus; MOREIRA, Marcos Donadello. **Projeto Esmeralda**. Salvador: Convênio SME/CBPM, v. 1, 1980.

SANTANA, Antônio de Jesus; MOREIRA, Marcos Donadello; COUTO, Pedro Antônio de Almeida. Esmeralda de Carnaíba e Socotó, Bahia: geologia e potencialidade econômica. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, Salvador. **Série Arquivos Abertos**, v. 9, 1995.

SANTOS, Fabrício Pereira dos. **Modelamento estrutural da Serra Jacobina e adjacências, Bahia**. 2018. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 2018.

SANTOS, Maria Luiza Lopes de Oliveira. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil**. 2008. 165 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

SANTOS, Pérsio de Souza. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1989.

SANTOS, Samara *et al.* Estudo cinético do processo de desidroxilação da caulinita. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 57., 2013, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: ABCERAM, 2013. p. 1775-1787.

SCHACKOW, Adilson; CORREIA, Sivaldo; EFFTING, Carmene. Influence of microstructural and morphological properties of raw natural clays on the reactivity of clay brick wastes in a cementitious blend matrix. **Cerâmica**, v. 66, p. 154-163, 2020.

SCHNEIDER, Hans; SCHREUER, Jörg; HILDMANN, Bernhard. Structure and properties of mullite - A review. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 28, n. 2, p. 329-344, 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/223890648>. Acesso em: 26 ago. 2024.

SCHROEDER, Carlos; KALIDINDI, Suresh. **High-performance ceramic materials: Advances in processing and applications**. Wiley, 2023.

SETZ, Luiz; DA SILVA, Antônio. **O processamento cerâmico sem mistério**. São Paulo: Editora Blucher, 2019.

SILVA, Fernanda Arruda Nogueira Gomes da. **Estudos de Caracterização Tecnológica e Beneficiamento do Caulim da Região Borborema - Seridó (RN)**. 2007. 162 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2007.

SILVA, Laís *et al.* Caracterização Química e Mineralógica de Argilas Utilizadas para a Produção de Cerâmica Vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 20, n. 4, p. 30-35, 2015.

SILVEIRA, Marina Duque. **Utilização de resíduos de mineração na construção civil**. 2015. 49 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SMITH, Matthew; PARKER, Stephen. Synthesis of CaMoO_4 via precipitation from molten Na_2MoO_4 . **Materials Chemistry and Physics**, v. 127, n. 1-2, p. 97-103, 2011.

SOKHANVAR, Saeed; SADEGHI, Mohammad. **Advances in ceramics: synthesis, processing, and applications**. Oxford: Elsevier, 2020.

SOUSA, Sidnei; HOLANDA, José. Sintering behavior of porous wall tile bodies during fast single-firing process. **Materials Research**, v. 8, p. 197-200, 2005.

SOUZA S. L *et al.* Geologia do "greenstone belt" Mundo Novo, Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39., 1996, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: SBG, 1996, n. 1, p. 103-106.

SOUZA, Ana Carolina Santos de. **Produção de molibdênio metálico a partir da molibdenita de Carnaíba (Bahia)**. 2014. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014. Disponível em: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/16990>. Acesso em: 26 ago. 2024.

TEIXEIRA, André *et al.* Influência dos tipos de matérias-primas e das condições de queima na cor do suporte cerâmico. **Revista Técnico Científica (IFSC)**, v. 3, n. 1, p. 45-52, 2012.

TEIXEIRA, João Batista *et al.* Gold mineralization in the Serra de Jacobina region, Bahia Brazil: tectonic framework and metallogenesis. **Mineralium Deposita**, v. 36, n. 3-4. p. 332-344, 2001.

TELES, Guilherme dos Santos. **Proveniência e idades de deposição dos sedimentos auríferos da bacia de Jacobina: Implicações sobre a evolução da bacia durante o Paleoarqueano e a gênese da mineralização**. 2013. 122 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

TOPITSCH, W. M. 1993. Geoquímica e petrologia dos ultramafitos e mafitos da Serra de Jacobina/Bahia: komatiitos, basaltos de alto Mg e toleítos numa bacia oceânica intracontinental. In: Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, 1993, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: CD ROM, 1993. p. 109-111.

TORQUATO, M. F. B. **Rochas ornamentais do noroeste do Ceará (Brasil): Propriedades tecnológicas, alteração e alterabilidade dos granitos Vermelho Filomena, Meruoca Clássico e Verde Ceará**. 2005. Tese (Doutorado), Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2005.

UNITED NATIONS. (2015). **Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development**. ONU. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication>. Acesso em: 24 de ago. de 2024.

VIEIRA, Carlos *et al.* Incorporação de lama de alto forno em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 53, p. 381-387, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/240971747>. Acesso em: 26 ago. 2024.

XU, Ruian *et al.* **Chemistry of zeolites and related porous materials: synthesis and structure**. Chichester: John Wiley & Sons (Asia) Pte. Ltd., 2007. ISBN 978-0-470-82233-3. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281721463>. Acesso em: 26 ago. 2024.

YIN, Qingrui; ZHU, Binghe; ZENG, Huarong. **Microstructure, property and processing of functional ceramics**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.

APÊNDICE A – ENSAIOS TECNOLÓGICOS DAS FORMULAÇÕES

1 – Ensaio Tecnológico de Propriedades Físico-Mecânicas – ARGILA

	Amostras	MEDIDAS ANTES DA QUEIMA			MEDIDAS APÓS A QUEIMA				
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Massa úmida (g) - 24h	Massa imersa (g)
850°C	A11	60,57	20,25	11,62	58,27	19,44	10,01	11,83	6,03
	A12	60,69	20,22	11,78	58,26	19,38	10,11	11,92	6,11
	A13	60,68	20,25	11,82	58,19	19,38	10,10	11,92	6,13
	A14	60,67	20,11	11,72	58,24	19,31	10,06	11,94	6,07
	A15	60,49	20,15	11,75	58,26	19,43	10,13	11,97	6,11
900°C	A21	60,55	20,04	11,15	58,46	19,32	9,96	11,66	6,13
	A22	60,55	20,17	11,05	58,48	19,35	9,92	11,58	6,04
	A23	60,54	20,16	11,09	58,54	19,45	9,96	11,66	6,03
	A24	60,56	20,04	11,07	58,47	19,41	9,92	11,68	6,02
	A25	60,54	20,04	11,04	58,48	19,44	9,90	11,62	6,06
950°C	A31	60,55	20,01	11,07	58,08	19,25	9,92	11,57	6,06
	A32	60,48	20,02	11,11	58,06	19,26	9,89	11,52	6,08
	A33	60,54	20,04	11,13	58,09	19,29	9,94	11,61	6,13
	A34	60,47	20,02	11,15	58,11	19,26	9,96	11,60	6,02
	A35	60,55	20,01	11,09	58,13	19,22	9,90	11,58	6,03
1000°C	A41	60,53	20,05	11,10	56,74	18,82	9,87	11,17	6,07
	A42	60,52	20,08	11,03	56,92	18,85	9,79	11,16	6,03
	A43	60,54	20,05	11,05	57,05	18,91	9,83	11,22	6,04
	A44	60,50	20,07	11,06	57,28	18,96	9,83	11,26	6,00
	A45	60,55	20,07	11,06	57,55	19,04	9,85	11,34	6,06
1100°C	A51	60,51	20,14	11,07	52,54	17,21	9,72	10,03	5,96
	A52	60,49	20,14	11,07	52,48	17,13	9,74	9,98	5,93
	A53	60,52	20,14	11,03	52,53	17,23	9,70	9,98	5,95
	A54	60,51	20,12	11,07	52,58	17,13	9,72	10,03	5,97
	A55	60,54	20,12	11,06	52,56	17,24	9,73	10,04	6,01
1200°C	A61	60,22	19,73	11,19	53,13	17,63	9,88	10,14	6,02
	A62	60,24	19,74	11,31	52,22	17,27	9,90	10,10	6,06
	A63	60,28	19,81	11,31	52,35	17,26	9,92	10,12	6,08
	A64	60,18	19,72	11,02	52,32	17,34	9,66	9,85	5,95
	A65	60,18	19,70	11,06	52,35	17,41	9,68	9,88	5,97

		$RLq = \frac{C_s - C_q}{C_s} \times 100$	$PA = \frac{Mu - Ms}{Mu - Mi} \times 100$	$AA = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100$	$PF = \frac{Ms - Mq}{Ms} \times 100$	$MEA = \frac{Ms}{Mu - Mi} \times 1$	$TRF = \frac{3PL}{2bh^2}$
Amostras		RL (%)	PA (%)	AA (%)	PF (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (MPa)
850°C	A11	3,80	31,38	18,18	13,86	1,73	12,75
	A12	4,00	31,15	17,90	14,18	1,74	12,82
	A13	4,10	31,43	18,02	14,55	1,74	12,61
	A14	4,01	32,03	18,69	14,16	1,71	
	A15	3,69	31,40	18,16	13,79	1,73	
900°C	A21	3,45	30,74	17,07	10,67	1,80	13,24
	A22	3,42	29,96	16,73	10,23	1,79	13,39
	A23	3,30	30,20	17,07	10,19	1,77	13,27
	A24	3,45	31,10	17,74	10,39	1,75	
	A25	3,40	30,94	17,37	10,33	1,78	
950°C	A31	4,08	29,95	16,63	10,39	1,80	15,92
	A32	4,00	29,96	16,48	10,98	1,82	16,03
	A33	4,05	30,47	16,80	10,69	1,81	16,05
	A34	3,90	29,39	16,47	10,67	1,78	
	A35	4,00	30,27	16,97	10,73	1,78	
1000°C	A41	6,26	25,49	13,17	11,08	1,94	22,34
	A42	5,95	26,71	13,99	11,24	1,91	22,56
	A43	5,76	26,83	14,14	11,04	1,90	23,09
	A44	5,32	27,19	14,55	11,12	1,87	
	A45	4,95	28,22	15,13	10,94	1,87	
1100°C	A51	13,17	7,62	3,19	12,20	2,39	26,01
	A52	13,24	5,93	2,46	12,01	2,40	26,12
	A53	13,20	6,95	2,89	12,06	2,41	26,18
	A54	13,11	7,64	3,19	12,20	2,39	
	A55	13,18	7,69	3,19	12,03	2,41	
1200°C	A61	11,77	6,31	2,63	11,71	2,40	29,92
	A62	13,31	4,95	2,02	12,47	2,45	30,11
	A63	13,16	4,95	2,02	12,29	2,46	30,21
	A64	13,06	4,87	1,97	12,34	2,48	
	A65	13,01	5,12	2,07	12,48	2,48	

ENSAIO DE RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA - RLq						ENSAIO DE POROSIDADE APARENTE - PA						ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA - AA					
Formulação	T (°C)	Código	RLq (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	PA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	AA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
A	850	A11	3,80	3,92	0,17	A	850	A11	31,38	31,48	0,33	A	850	A11	18,18	18,19	0,30
		A12	4,00					A12	31,15					A12	17,90		
		A13	4,10					A13	31,43					A13	18,02		
		A14	4,01					A14	32,03					A14	18,69		
		A15	3,69					A15	31,40					A15	18,16		
	900	A21	3,45	3,41	0,06		900	A21	30,74	30,59	0,49		900	A21	17,07	17,20	0,38
		A22	3,42					A22	29,96					A22	16,73		
		A23	3,30					A23	30,20					A23	17,07		
		A24	3,45					A24	31,10					A24	17,74		
		A25	3,40					A25	30,94					A25	17,37		
	950	A31	4,1	4,01	0,07		950	A31	29,95	30,01	0,41		950	A31	16,63	16,67	0,22
		A32	4,0					A32	29,96					A32	16,48		
		A33	4,0					A33	30,47					A33	16,80		
		A34	3,9					A34	29,39					A34	16,47		
		A35	4,0					A35	30,27					A35	16,97		
	1000	A41	6,26	5,65	0,52		1000	A41	25,49	26,89	0,98		1000	A41	13,17	14,20	0,72
		A42	5,95					A42	26,71					A42	13,99		
		A43	5,76					A43	26,83					A43	14,14		
		A44	5,32					A44	27,19					A44	14,55		
		A45	4,95					A45	28,22					A45	15,13		
	1100	A51	13,17	13,18	0,05		1100	A51	7,62	7,16	0,76		1100	A51	3,19	2,98	0,32
		A52	13,24					A52	5,93					A52	2,46		
		A53	13,20					A53	6,95					A53	2,89		
		A54	13,11					A54	7,64					A54	3,19		
		A55	13,18					A55	7,69					A55	3,19		
1200	A61	11,77	12,86	0,62	1200	A61	6,31	5,24	0,61	1200	A61	2,63	2,14	0,28			
	A62	13,31				A62	4,95				A62	2,02					
	A63	13,16				A63	4,95				A63	2,02					
	A64	13,06				A64	4,87				A64	1,97					
	A65	13,01				A65	5,12				A65	2,07					

ENSAIO DE PERDA AO FOGO - PF						ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE - MEA						ENSAIO DE TENSÃO DE RUPTURA à FLEXÃO - TRF					
Formulação	T (°C)	Código	PF (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	MEA (g/cm³)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	TRF (MPa)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
A	850	A11	13,86	14,11	0,30	A	850	A11	1,73	1,73	0,01	A	850	A11	12,75	12,73	0,11
		A12	14,18					A12	1,74					A12	12,82		
		A13	14,55					A13	1,74					A13	12,61		
		A14	14,16					A14	1,71					A14			
		A15	13,79					A15	1,73					A15			
	900	A21	10,67	10,36	0,19		900	A21	1,80	1,78	0,02		900	A21	13,24	13,30	0,08
		A22	10,23					A22	1,79					A22	13,39		
		A23	10,19					A23	1,77					A23	13,27		
		A24	10,39					A24	1,75					A24			
		A25	10,33					A25	1,78					A25			
	950	A31	10,39	10,69	0,21		950	A31	1,80	1,80	0,02		950	A31	15,92	16,00	0,07
		A32	10,98					A32	1,82					A32	16,03		
		A33	10,69					A33	1,81					A33	16,05		
		A34	10,67					A34	1,78					A34			
		A35	10,73					A35	1,78					A35			
	1000	A41	11,08	11,09	0,11		1000	A41	1,94	1,90	0,03		1000	A41	22,34	22,66	0,39
		A42	11,24					A42	1,91					A42	22,56		
		A43	11,04					A43	1,90					A43	23,09		
		A44	11,12					A44	1,87					A44			
		A45	10,94					A45	1,87					A45			
	1100	A51	12,20	12,10	0,09		1100	A51	2,39	2,40	0,01		1100	A51	26,01	26,10	0,09
		A52	12,01					A52	2,40					A52	26,12		
		A53	12,06					A53	2,41					A53	26,18		
		A54	12,20					A54	2,39					A54			
		A55	12,03					A55	2,41					A55			
1200	A61	11,71	12,26	0,32	1200	A61	2,40	2,45	0,03	1200	A61	29,92	30,08	0,15			
	A62	12,47				A62	2,45				A62	30,11					
	A63	12,29				A63	2,46				A63	30,21					
	A64	12,34				A64	2,48				A64						
	A65	12,48				A65	2,48				A65						

2 – Ensaios Tecnológicos de Propriedades Físico-Mecânicas – FORMULAÇÃO C₁₀

	Amostras	MEDIDAS ANTES DA QUEIMA			MEDIDAS APÓS A QUEIMA				
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Massa úmida (g) - 24h	Massa imersa (g)
850°C	C ₁₀ -11	60,64	20,08	11,51	59,10	19,53	10,14	11,88	6,19
	C ₁₀ -12	60,64	20,08	11,50	58,97	19,62	10,15	11,82	6,25
	C ₁₀ -13	60,68	20,09	11,50	59,01	19,60	10,17	11,77	6,26
	C ₁₀ -14	60,62	20,08	11,50	58,93	19,59	10,13	11,79	6,16
	C ₁₀ -15	60,63	20,09	11,48	59,00	19,62	10,12	11,78	6,21
900°C	C ₁₀ -21	60,55	20,07	11,20	58,97	19,61	10,16	11,81	6,15
	C ₁₀ -22	60,55	20,08	11,25	58,93	19,56	10,16	11,85	6,15
	C ₁₀ -23	60,57	20,07	11,13	58,94	19,55	10,07	11,70	6,05
	C ₁₀ -24	60,60	20,08	11,25	58,86	19,56	10,17	11,78	6,14
	C ₁₀ -25	60,58	20,07	11,20	58,87	19,51	10,14	11,76	6,15
950°C	C ₁₀ -31	60,67	20,02	11,29	58,55	19,49	10,14	11,75	6,19
	C ₁₀ -32	60,61	20,03	11,22	58,40	19,35	10,04	11,63	6,06
	C ₁₀ -33	60,62	20,04	11,18	58,43	19,34	10,02	11,59	6,18
	C ₁₀ -34	60,55	20,01	11,13	58,47	19,40	10,00	11,52	6,13
	C ₁₀ -35	60,65	20,03	11,23	58,25	19,30	10,07	11,59	6,08
1000°C	C ₁₀ -41	60,56	20,04	11,15	57,86	19,17	9,98	11,30	6,08
	C ₁₀ -42	60,56	20,07	11,09	57,53	19,09	9,93	11,13	6,00
	C ₁₀ -43	60,55	20,07	11,16	57,26	19,10	9,98	11,10	6,05
	C ₁₀ -44	60,57	20,09	11,19	57,13	19,06	9,96	11,09	6,02
	C ₁₀ -45	60,58	20,07	11,12	56,89	18,78	9,91	10,95	6,00
1100°C	C ₁₀ -51	60,59	20,12	11,25	54,77	18,12	10,00	10,43	6,02
	C ₁₀ -52	60,61	20,07	11,20	54,51	18,12	9,94	10,30	6,04
	C ₁₀ -53	60,61	20,11	11,22	54,52	18,02	9,95	10,31	6,00
	C ₁₀ -54	60,60	20,10	11,28	54,62	18,13	10,01	10,33	5,99
	C ₁₀ -55	60,59	20,09	11,29	54,94	18,10	10,01	10,38	5,96
1200°C	C ₁₀ -61	60,61	20,09	11,30	54,62	17,80	10,02	10,09	5,94
	C ₁₀ -62	60,60	20,06	11,33	54,64	17,89	10,06	10,16	5,86
	C ₁₀ -63	60,62	20,08	11,31	54,48	17,86	10,06	10,09	5,92
	C ₁₀ -64	60,66	20,09	11,32	54,44	17,75	10,01	10,12	5,91
	C ₁₀ -65	60,64	20,09	11,29	54,56	17,73	10,01	10,11	5,87

		$RLq = \frac{Cs - Cq}{Cq} \times 100$	$PA = \frac{Mu - Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$AA = \frac{Ms - Ms}{Ms} \times 100$	$PF = \frac{Ms - Mq}{Mq} \times 100$	$MEA = \frac{Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$TRF = \frac{3PL}{2bh^2}$
	Amostras	RL (%)	PA (%)	AA (%)	PF (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (MPa)
850°C	C ₁₀ -11	2,54	30,58	17,16	11,90	1,78	11,69
	C ₁₀ -12	2,75	29,98	16,45	11,74	1,82	11,75
	C ₁₀ -13	2,75	29,04	15,73	11,57	1,85	11,08
	C ₁₀ -14	2,79	29,48	16,39	11,91	1,80	
	C ₁₀ -15	2,69	29,80	16,40	11,85	1,82	
900°C	C ₁₀ -21	2,61	29,15	16,24	9,29	1,80	11,63
	C ₁₀ -22	2,68	29,65	16,63	9,69	1,78	11,03
	C ₁₀ -23	2,69	28,85	16,19	9,52	1,78	11,42
	C ₁₀ -24	2,87	28,55	15,83	9,60	1,80	
	C ₁₀ -25	2,82	28,88	15,98	9,46	1,81	
950°C	C ₁₀ -31	3,49	28,96	15,88	10,19	1,82	11,59
	C ₁₀ -32	3,65	28,55	15,84	10,52	1,80	11,42
	C ₁₀ -33	3,61	29,02	15,67	10,38	1,85	11,59
	C ₁₀ -34	3,44	28,20	15,20	10,15	1,86	
	C ₁₀ -35	3,96	27,59	15,09	10,33	1,83	
1000°C	C ₁₀ -41	4,46	25,29	13,23	10,49	1,91	36,21
	C ₁₀ -42	5,00	23,39	12,08	10,46	1,94	36,24
	C ₁₀ -43	5,43	22,18	11,22	10,57	1,98	36,48
	C ₁₀ -44	5,68	22,29	11,35	10,99	1,96	
	C ₁₀ -45	6,09	21,01	10,49	10,88	2,00	
1100°C	C ₁₀ -51	9,61	9,75	4,30	11,11	2,27	34,71
	C ₁₀ -52	10,06	8,45	3,62	11,25	2,33	36,82
	C ₁₀ -53	10,05	8,35	3,62	11,32	2,31	36,72
	C ₁₀ -54	9,87	7,37	3,20	11,26	2,31	
	C ₁₀ -55	9,32	8,37	3,70	11,34	2,26	
1200°C	C ₁₀ -61	9,88	1,69	0,70	11,33	2,41	64,54
	C ₁₀ -62	9,83	2,33	0,99	11,21	2,34	64,51
	C ₁₀ -63	10,13	0,72	0,30	11,05	2,41	64,58
	C ₁₀ -64	10,25	2,61	1,10	11,57	2,38	
	C ₁₀ -65	10,03	2,36	1,00	11,34	2,36	

ENSAIO DE PERDA AO FOGO - PF						ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE - MEA						ENSAIO DE TENSÃO DE RUPTURA à FLEXÃO - TRF					
Formulação	T (°C)	Código	PF (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	MEA (g/cm ³)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	TRF (MPa)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
C ₁₀	850	C ₁₀ -11	11,90	11,79	0,15	C ₁₀	850	C ₁₀ -11	1,78	1,81	0,02	C ₁₀	850	C ₁₀ -11	11,69	11,51	0,37
		C ₁₀ -12	11,74					C ₁₀ -12	1,82					C ₁₀ -12	11,75		
		C ₁₀ -13	11,57					C ₁₀ -13	1,85					C ₁₀ -13	11,08		
		C ₁₀ -14	11,91					C ₁₀ -14	1,80					C ₁₀ -14			
		C ₁₀ -15	11,85					C ₁₀ -15	1,82					C ₁₀ -15			
	900	C ₁₀ -21	9,29	9,51	0,15		900	C ₁₀ -21	1,80	1,79	0,01		900	C ₁₀ -21	11,63	11,36	0,30
		C ₁₀ -22	9,69					C ₁₀ -22	1,78					C ₁₀ -22	11,03		
		C ₁₀ -23	9,52					C ₁₀ -23	1,78					C ₁₀ -23	11,42		
		C ₁₀ -24	9,60					C ₁₀ -24	1,80					C ₁₀ -24			
		C ₁₀ -25	9,46					C ₁₀ -25	1,81					C ₁₀ -25			
	950	C ₁₀ -31	10,19	10,31	0,15		950	C ₁₀ -31	1,82	1,82	0,02		950	C ₁₀ -31	11,59	11,53	0,10
		C ₁₀ -32	10,52					C ₁₀ -32	1,80					C ₁₀ -32	11,42		
		C ₁₀ -33	10,38					C ₁₀ -33	1,85					C ₁₀ -33	11,59		
		C ₁₀ -34	10,15					C ₁₀ -34	1,86					C ₁₀ -34			
		C ₁₀ -35	10,33					C ₁₀ -35	1,83					C ₁₀ -35			
	1000	C ₁₀ -41	10,49	10,68	0,24		1000	C ₁₀ -41	1,91	1,96	0,04		1000	C ₁₀ -41	36,21	36,31	0,15
		C ₁₀ -42	10,46					C ₁₀ -42	1,94					C ₁₀ -42	36,24		
		C ₁₀ -43	10,57					C ₁₀ -43	1,98					C ₁₀ -43	36,48		
		C ₁₀ -44	10,99					C ₁₀ -44	1,96					C ₁₀ -44			
		C ₁₀ -45	10,88					C ₁₀ -45	2,00					C ₁₀ -45			
	1100	C ₁₀ -51	11,11	11,26	0,09		1100	C ₁₀ -51	2,27	2,30	0,03		1100	C ₁₀ -51	34,71	36,08	1,19
		C ₁₀ -52	11,25					C ₁₀ -52	2,33					C ₁₀ -52	36,82		
		C ₁₀ -53	11,32					C ₁₀ -53	2,31					C ₁₀ -53	36,72		
		C ₁₀ -54	11,26					C ₁₀ -54	2,31					C ₁₀ -54			
		C ₁₀ -55	11,34					C ₁₀ -55	2,26					C ₁₀ -55			
1200	C ₁₀ -61	11,33	11,30	0,19	1200	C ₁₀ -61	2,41	2,38	0,03	1200	C ₁₀ -61	64,54	64,54	0,04			
	C ₁₀ -62	11,21				C ₁₀ -62	2,34				C ₁₀ -62	64,51					
	C ₁₀ -63	11,05				C ₁₀ -63	2,41				C ₁₀ -63	64,58					
	C ₁₀ -64	11,57				C ₁₀ -64	2,38				C ₁₀ -64						
	C ₁₀ -65	11,34				C ₁₀ -65	2,36				C ₁₀ -65						

ENSAIO DE RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA - RLq						ENSAIO DE POROSIDADE APARENTE - PA						ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA - AA					
Formulação	T (°C)	Código	RLq (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	PA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	AA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
C ₁₀	850	C ₁₀ -11	2,54	2,70	0,10	C ₁₀	850	C ₁₀ -11	30,58	29,78	0,57	C ₁₀	850	C ₁₀ -11	17,16	16,43	0,51
		C ₁₀ -12	2,75					C ₁₀ -12	29,98					C ₁₀ -12	16,45		
		C ₁₀ -13	2,75					C ₁₀ -13	29,04					C ₁₀ -13	15,73		
		C ₁₀ -14	2,79					C ₁₀ -14	29,48					C ₁₀ -14	16,39		
		C ₁₀ -15	2,69					C ₁₀ -15	29,80					C ₁₀ -15	16,40		
	900	C ₁₀ -21	2,61	2,73	0,11		900	C ₁₀ -21	29,15	29,01	0,41		900	C ₁₀ -21	16,24	16,17	0,31
		C ₁₀ -22	2,68					C ₁₀ -22	29,65					C ₁₀ -22	16,63		
		C ₁₀ -23	2,69					C ₁₀ -23	28,85					C ₁₀ -23	16,19		
		C ₁₀ -24	2,87					C ₁₀ -24	28,55					C ₁₀ -24	15,83		
		C ₁₀ -25	2,82					C ₁₀ -25	28,88					C ₁₀ -25	15,98		
	950	C ₁₀ -31	3,49	3,63	0,20		950	C ₁₀ -31	28,96	28,46	0,59		950	C ₁₀ -31	15,88	15,54	0,36
		C ₁₀ -32	3,65					C ₁₀ -32	28,55					C ₁₀ -32	15,84		
		C ₁₀ -33	3,61					C ₁₀ -33	29,02					C ₁₀ -33	15,67		
		C ₁₀ -34	3,44					C ₁₀ -34	28,20					C ₁₀ -34	15,20		
		C ₁₀ -35	3,96					C ₁₀ -35	27,59					C ₁₀ -35	15,09		
	1000	C ₁₀ -41	4,46	5,33	0,63		1000	C ₁₀ -41	25,29	22,83	1,61		1000	C ₁₀ -41	13,23	11,67	1,03
		C ₁₀ -42	5,00					C ₁₀ -42	23,39					C ₁₀ -42	12,08		
		C ₁₀ -43	5,43					C ₁₀ -43	22,18					C ₁₀ -43	11,22		
		C ₁₀ -44	5,68					C ₁₀ -44	22,29					C ₁₀ -44	11,35		
		C ₁₀ -45	6,09					C ₁₀ -45	21,01					C ₁₀ -45	10,49		
	1100	C ₁₀ -51	9,61	9,78	0,32		1100	C ₁₀ -51	9,75	8,46	0,85		1100	C ₁₀ -51	4,30	3,69	0,40
		C ₁₀ -52	10,06					C ₁₀ -52	8,45					C ₁₀ -52	3,62		
		C ₁₀ -53	10,05					C ₁₀ -53	8,35					C ₁₀ -53	3,62		
		C ₁₀ -54	9,87					C ₁₀ -54	7,37					C ₁₀ -54	3,20		
		C ₁₀ -55	9,32					C ₁₀ -55	8,37					C ₁₀ -55	3,70		
1200	C ₁₀ -61	9,88	10,03	0,17	1200	C ₁₀ -61	1,69	1,94	0,76	1200	C ₁₀ -61	0,70	0,82	0,33			
	C ₁₀ -62	9,83				C ₁₀ -62	2,33				C ₁₀ -62	0,99					
	C ₁₀ -63	10,13				C ₁₀ -63	0,72				C ₁₀ -63	0,30					
	C ₁₀ -64	10,25				C ₁₀ -64	2,61				C ₁₀ -64	1,10					
	C ₁₀ -65	10,03				C ₁₀ -65	2,36				C ₁₀ -65	1,00					

3 - Ensaios Tecnológicos de Propriedades Físico-Mecânicas – FORMULAÇÃO C₂₀

	Amostras	MEDIDAS ANTES DA QUEIMA			MEDIDAS APÓS A QUEIMA				
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Massa úmida (g) - 24h	Massa imersa (g)
850°C	C ₂₀ -11	60,66	20,11	11,56	59,43	19,77	10,30	11,91	6,28
	C ₂₀ -12	60,69	20,08	11,52	59,45	19,68	10,27	11,92	6,22
	C ₂₀ -13	60,66	20,09	11,58	59,43	19,76	10,32	11,94	6,26
	C ₂₀ -14	60,69	20,09	11,51	59,45	19,66	10,26	11,90	6,23
	C ₂₀ -15	60,65	20,12	11,51	59,50	19,68	10,25	11,92	6,26
900°C	C ₂₀ -21	60,63	20,10	11,31	59,38	19,77	10,28	11,87	6,18
	C ₂₀ -22	60,64	20,12	11,14	59,32	19,74	10,07	11,65	6,05
	C ₂₀ -23	60,61	20,15	11,34	59,36	19,85	10,29	11,80	6,21
	C ₂₀ -24	60,62	20,09	11,35	59,32	19,74	10,29	11,85	6,16
	C ₂₀ -25	60,63	20,13	11,33	59,43	19,76	10,30	11,88	6,26
950°C	C ₂₀ -31	60,65	20,03	11,36	58,79	19,46	10,21	11,75	6,23
	C ₂₀ -32	60,60	20,02	11,30	58,81	19,46	10,18	11,65	6,14
	C ₂₀ -33	60,58	20,06	11,36	58,80	19,45	10,23	11,67	6,19
	C ₂₀ -34	60,66	20,05	11,32	58,81	19,51	10,21	11,68	6,15
	C ₂₀ -35	60,65	20,03	11,26	58,87	19,49	10,07	11,50	6,08
1000°C	C ₂₀ -41	60,59	20,08	11,25	57,72	19,14	10,07	11,12	6,05
	C ₂₀ -42	60,61	20,10	11,23	57,86	19,14	10,07	11,08	6,19
	C ₂₀ -43	60,60	20,09	11,21	57,89	19,16	10,05	11,07	6,11
	C ₂₀ -44	60,59	20,11	11,24	57,88	19,19	10,05	11,08	6,12
	C ₂₀ -45	60,58	20,08	11,26	57,92	19,19	10,09	11,12	6,11
1100°C	C ₂₀ -51	60,62	20,11	11,35	57,13	18,85	10,17	10,64	5,84
	C ₂₀ -52	60,61	20,09	11,31	57,08	18,85	10,12	10,55	5,79
	C ₂₀ -53	60,62	20,10	11,35	56,98	18,81	10,16	10,62	5,85
	C ₂₀ -54	60,64	20,07	11,32	57,28	19,02	10,13	10,62	5,85
	C ₂₀ -55	60,64	20,07	11,34	57,34	18,92	10,17	10,67	5,85
1200°C	C ₂₀ -61	60,66	20,05	11,36	56,27	19,17	10,19	10,23	5,55
	C ₂₀ -62	60,65	20,09	11,35	56,66	19,16	10,17	10,20	5,31
	C ₂₀ -63	60,65	20,08	11,30	56,57	19,34	10,17	10,22	5,27
	C ₂₀ -64	60,64	20,09	11,35	56,44	19,13	10,16	10,18	5,34
	C ₂₀ -65	60,74	20,08	11,40	56,59	19,27	10,18	10,19	5,24

		$RLq = \frac{Cs - Cq}{Cq} \times 100$	$PA = \frac{Mu - Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$AA = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100$	$PF = \frac{Ms - Mq}{Mq} \times 100$	$MEA = \frac{Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$TRF = \frac{3PL}{2bh^2}$
	Amostras	RL (%)	PA (%)	AA (%)	PF (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (MPa)
850°C	C ₂₀ -11	2,03	28,60	15,63	10,90	1,83	12,97
	C ₂₀ -12	2,04	28,95	16,07	10,85	1,80	12,75
	C ₂₀ -13	2,03	28,52	15,70	10,88	1,82	12,09
	C ₂₀ -14	2,04	28,92	15,98	10,86	1,81	
	C ₂₀ -15	1,90	29,51	16,29	10,95	1,81	
900°C	C ₂₀ -21	2,06	27,94	15,47	9,11	1,81	13,69
	C ₂₀ -22	2,18	28,21	15,69	9,61	1,80	13,72
	C ₂₀ -23	2,06	27,01	14,67	9,26	1,84	13,71
	C ₂₀ -24	2,14	27,42	15,16	9,34	1,81	
	C ₂₀ -25	1,98	28,11	15,34	9,09	1,83	
950°C	C ₂₀ -31	3,07	27,90	15,08	10,12	1,85	13,62
	C ₂₀ -32	2,95	26,68	14,44	9,91	1,85	13,59
	C ₂₀ -33	2,94	26,28	14,08	9,95	1,87	13,58
	C ₂₀ -34	3,05	26,58	14,40	9,81	1,85	
	C ₂₀ -35	2,93	26,38	14,20	10,57	1,86	
1000°C	C ₂₀ -41	4,74	20,71	10,43	10,49	1,99	37,28
	C ₂₀ -42	4,54	20,65	10,03	10,33	2,06	37,12
	C ₂₀ -43	4,47	20,56	10,15	10,35	2,03	37,27
	C ₂₀ -44	4,47	20,77	10,25	10,59	2,03	
	C ₂₀ -45	4,39	20,56	10,21	10,39	2,01	
1100°C	C ₂₀ -51	5,76	9,79	4,62	10,40	2,12	38,91
	C ₂₀ -52	5,82	9,03	4,25	10,52	2,13	38,89
	C ₂₀ -53	6,00	9,64	4,53	10,48	2,13	38,85
	C ₂₀ -54	5,54	10,27	4,84	10,51	2,12	
	C ₂₀ -55	5,44	10,37	4,92	10,32	2,11	
1200°C	C ₂₀ -61	7,24	0,85	0,39	10,30	2,18	65,11
	C ₂₀ -62	6,58	0,61	0,29	10,40	2,08	65,13
	C ₂₀ -63	6,73	1,01	0,49	10,00	2,05	66,25
	C ₂₀ -64	6,93	0,41	0,20	10,48	2,10	
	C ₂₀ -65	6,83	0,20	0,10	10,70	2,06	

ENSAIO DE PERDA AO FOGO - PF					ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE - MEA					ENSAIO DE TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO - TRF							
Formulação	T (°C)	Código	PF (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	MEA (g/cm ³)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	TRF (MPa)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
C ₂₀	850	C ₂₀ -11	10,90	10,89	0,04	C ₂₀	850	C ₂₀ -11	1,83	1,81	0,01	C ₂₀	850	C ₂₀ -11	12,97	12,60	0,46
		C ₂₀ -12	10,85					C ₂₀ -12	1,80					C ₂₀ -12	12,75		
		C ₂₀ -13	10,88					C ₂₀ -13	1,82					C ₂₀ -13	12,09		
		C ₂₀ -14	10,86					C ₂₀ -14	1,81					C ₂₀ -14			
		C ₂₀ -15	10,95					C ₂₀ -15	1,81					C ₂₀ -15			
	900	C ₂₀ -21	9,11	9,28	0,21		900	C ₂₀ -21	1,81	1,82	0,02		900	C ₂₀ -21	13,69	13,71	0,02
		C ₂₀ -22	9,61					C ₂₀ -22	1,80					C ₂₀ -22	13,72		
		C ₂₀ -23	9,26					C ₂₀ -23	1,84					C ₂₀ -23	13,71		
		C ₂₀ -24	9,34					C ₂₀ -24	1,81					C ₂₀ -24			
		C ₂₀ -25	9,09					C ₂₀ -25	1,83					C ₂₀ -25			
	950	C ₂₀ -31	10,12	10,07	0,30		950	C ₂₀ -31	1,85	1,85	0,01		950	C ₂₀ -31	13,62	13,60	0,02
		C ₂₀ -32	9,91					C ₂₀ -32	1,85					C ₂₀ -32	13,59		
		C ₂₀ -33	9,95					C ₂₀ -33	1,87					C ₂₀ -33	13,58		
		C ₂₀ -34	9,81					C ₂₀ -34	1,85					C ₂₀ -34			
		C ₂₀ -35	10,57					C ₂₀ -35	1,86					C ₂₀ -35			
	1000	C ₂₀ -41	10,49	10,43	0,11		1000	C ₂₀ -41	1,99	2,02	0,03		1000	C ₂₀ -41	37,28	37,22	0,09
		C ₂₀ -42	10,33					C ₂₀ -42	2,06					C ₂₀ -42	37,12		
		C ₂₀ -43	10,35					C ₂₀ -43	2,03					C ₂₀ -43	37,27		
		C ₂₀ -44	10,59					C ₂₀ -44	2,03					C ₂₀ -44			
		C ₂₀ -45	10,39					C ₂₀ -45	2,01					C ₂₀ -45			
	1100	C ₂₀ -51	10,40	10,45	0,09		1100	C ₂₀ -51	2,12	2,12	0,01		1100	C ₂₀ -51	38,91	38,88	0,03
		C ₂₀ -52	10,52					C ₂₀ -52	2,13					C ₂₀ -52	38,89		
		C ₂₀ -53	10,48					C ₂₀ -53	2,13					C ₂₀ -53	38,85		
		C ₂₀ -54	10,51					C ₂₀ -54	2,12					C ₂₀ -54			
		C ₂₀ -55	10,32					C ₂₀ -55	2,11					C ₂₀ -55			
1200	C ₂₀ -61	10,30	10,38	0,26	1200	C ₂₀ -61	2,18	2,09	0,05	1200	C ₂₀ -61	65,11	65,50	0,65			
	C ₂₀ -62	10,40				C ₂₀ -62	2,08				C ₂₀ -62	65,13					
	C ₂₀ -63	10,00				C ₂₀ -63	2,05				C ₂₀ -63	66,25					
	C ₂₀ -64	10,48				C ₂₀ -64	2,10				C ₂₀ -64						
	C ₂₀ -65	10,70				C ₂₀ -65	2,06				C ₂₀ -65						

ENSAIO DE RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA - RLq					ENSAIO DE POROSIDADE APARENTE - PA					ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA - AA							
Formulação	T (°C)	Código	RLq (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	PA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	AA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
C ₂₀	850	C ₂₀ -11	2,03	2,01	0,06	C ₂₀	850	C ₂₀ -11	28,60	28,90	0,39	C ₂₀	850	C ₂₀ -11	15,63	15,93	0,27
		C ₂₀ -12	2,04					C ₂₀ -12	28,95					C ₂₀ -12	16,07		
		C ₂₀ -13	2,03					C ₂₀ -13	28,52					C ₂₀ -13	15,70		
		C ₂₀ -14	2,04					C ₂₀ -14	28,92					C ₂₀ -14	15,98		
		C ₂₀ -15	1,90					C ₂₀ -15	29,51					C ₂₀ -15	16,29		
	900	C ₂₀ -21	2,06	2,08	0,08		900	C ₂₀ -21	27,94	27,74	0,51		900	C ₂₀ -21	15,47	15,27	0,38
		C ₂₀ -22	2,18					C ₂₀ -22	28,21					C ₂₀ -22	15,69		
		C ₂₀ -23	2,06					C ₂₀ -23	27,01					C ₂₀ -23	14,67		
		C ₂₀ -24	2,14					C ₂₀ -24	27,42					C ₂₀ -24	15,16		
		C ₂₀ -25	1,98					C ₂₀ -25	28,11					C ₂₀ -25	15,34		
	950	C ₂₀ -31	3,07	2,99	0,06		950	C ₂₀ -31	27,90	26,76	0,65		950	C ₂₀ -31	15,08	14,44	0,39
		C ₂₀ -32	2,95					C ₂₀ -32	26,68					C ₂₀ -32	14,44		
		C ₂₀ -33	2,94					C ₂₀ -33	26,28					C ₂₀ -33	14,08		
		C ₂₀ -34	3,05					C ₂₀ -34	26,58					C ₂₀ -34	14,40		
		C ₂₀ -35	2,93					C ₂₀ -35	26,38					C ₂₀ -35	14,20		
	1000	C ₂₀ -41	4,74	4,52	0,13		1000	C ₂₀ -41	20,71	20,65	0,09		1000	C ₂₀ -41	10,43	10,21	0,15
		C ₂₀ -42	4,54					C ₂₀ -42	20,65					C ₂₀ -42	10,03		
		C ₂₀ -43	4,47					C ₂₀ -43	20,56					C ₂₀ -43	10,15		
		C ₂₀ -44	4,47					C ₂₀ -44	20,77					C ₂₀ -44	10,25		
		C ₂₀ -45	4,39					C ₂₀ -45	20,56					C ₂₀ -45	10,21		
	1100	C ₂₀ -51	5,76	5,71	0,22		1100	C ₂₀ -51	9,79	9,82	0,54		1100	C ₂₀ -51	4,62	4,63	0,26
		C ₂₀ -52	5,82					C ₂₀ -52	9,03					C ₂₀ -52	4,25		
		C ₂₀ -53	6,00					C ₂₀ -53	9,64					C ₂₀ -53	4,53		
		C ₂₀ -54	5,54					C ₂₀ -54	10,27					C ₂₀ -54	4,84		
		C ₂₀ -55	5,44					C ₂₀ -55	10,37					C ₂₀ -55	4,92		
1200	C ₂₀ -61	7,24	6,86	0,25	1200	C ₂₀ -61	0,85	0,62	0,33	1200	C ₂₀ -61	0,39	0,29	0,16			
	C ₂₀ -62	6,58				C ₂₀ -62	0,61				C ₂₀ -62	0,29					
	C ₂₀ -63	6,73				C ₂₀ -63	1,01				C ₂₀ -63	0,49					
	C ₂₀ -64	6,93				C ₂₀ -64	0,41				C ₂₀ -64	0,20					
	C ₂₀ -65	6,83				C ₂₀ -65	0,20				C ₂₀ -65	0,10					

4 - Ensaios Tecnológicos de Propriedades Físico-Mecânicas – FORMULAÇÃO C₃₀

	Amostras	MEDIDAS ANTES DA QUEIMA			MEDIDAS APÓS A QUEIMA				
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Massa úmida (g) - 24h	Massa imersa (g)
850°C	C ₃₀ -11	60,69	20,19	11,61	59,91	19,94	10,48	12,11	6,36
	C ₃₀ -12	60,67	20,20	11,53	59,90	19,84	10,44	12,01	6,32
	C ₃₀ -13	60,66	20,20	11,48	59,90	19,84	10,37	11,98	6,25
	C ₃₀ -14	60,66	20,12	11,54	59,94	19,93	10,48	12,06	6,30
	C ₃₀ -15	60,69	20,22	11,52	59,90	19,92	10,41	12,08	6,30
900°C	C ₃₀ -21	60,66	20,11	11,46	59,81	19,81	10,52	12,04	6,49
	C ₃₀ -22	60,67	20,12	11,46	59,73	19,79	10,48	12,01	6,30
	C ₃₀ -23	60,63	20,10	11,40	59,78	19,77	10,44	12,01	6,30
	C ₃₀ -24	60,61	20,11	11,40	59,82	19,80	10,46	12,01	6,31
	C ₃₀ -25	60,65	20,10	11,44	59,83	19,83	10,51	12,12	6,41
950°C	C ₃₀ -31	60,56	20,01	11,27	59,27	19,63	10,25	11,62	6,19
	C ₃₀ -32	60,56	20,02	11,26	59,33	19,63	10,25	11,57	6,14
	C ₃₀ -33	60,55	20,01	11,28	59,35	19,64	10,25	11,58	6,14
	C ₃₀ -34	60,57	20,05	11,34	59,27	19,65	10,26	11,61	6,11
	C ₃₀ -35	60,55	20,02	11,33	59,35	19,65	10,29	11,67	6,19
1000°C	C ₃₀ -41	60,61	20,09	11,28	59,35	19,58	10,20	11,47	6,18
	C ₃₀ -42	60,61	20,10	11,30	59,34	19,58	10,20	11,44	6,17
	C ₃₀ -43	60,60	20,13	11,30	59,30	19,59	10,22	11,49	6,15
	C ₃₀ -44	60,62	20,08	11,30	59,37	19,60	10,21	11,50	6,16
	C ₃₀ -45	60,63	20,11	11,31	59,27	19,60	10,22	11,51	6,10
1100°C	C ₃₀ -51	60,63	20,12	11,36	58,86	19,48	10,24	10,97	5,95
	C ₃₀ -52	60,67	20,10	11,40	58,89	19,49	10,31	11,07	5,82
	C ₃₀ -53	60,66	20,09	11,38	58,96	19,49	10,28	11,02	5,89
	C ₃₀ -54	60,63	20,09	11,36	58,98	19,48	10,27	11,09	5,97
	C ₃₀ -55	60,63	20,07	11,32	58,91	19,60	10,22	11,05	5,79
1200°C	C ₃₀ -61	60,71	20,12	11,42	*	*	*	*	*
	C ₃₀ -62	60,72	20,07	11,41	*	*	*	*	*
	C ₃₀ -63	60,72	20,05	11,40	*	*	*	*	*
	C ₃₀ -64	60,72	20,14	11,49	*	*	*	*	*
	C ₃₀ -65	60,72	20,06	11,35	*	*	*	*	*

* Amostra fundiu

	Amostras	$RLq = \frac{Cs - Cq}{Cq} \times 100$	$PA = \frac{Mu - Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$AA = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100$	$PF = \frac{Ms - Mq}{Mq} \times 100$	$MEA = \frac{Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$TRF = \frac{3PL}{2bh^2}$
		RL (%)	PA (%)	AA (%)	PF (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (MPa)
850°C	C ₃₀ -11	1,29	28,35	15,55	9,73	1,82	13,24
	C ₃₀ -12	1,27	27,59	15,04	9,45	1,83	13,31
	C ₃₀ -13	1,25	28,10	15,53	9,67	1,81	12,33
	C ₃₀ -14	1,19	27,43	15,08	9,19	1,82	
	C ₃₀ -15	1,30	28,89	16,04	9,64	1,80	
900°C	C ₃₀ -21	1,40	27,39	14,45	8,20	1,90	13,1
	C ₃₀ -22	1,55	26,80	14,60	8,55	1,84	13,82
	C ₃₀ -23	1,40	27,50	15,04	8,42	1,83	13,81
	C ₃₀ -24	1,30	27,19	14,82	8,25	1,84	
	C ₃₀ -25	1,35	28,20	15,32	8,13	1,84	
950°C	C ₃₀ -31	2,13	25,23	13,37	9,05	1,89	16,21
	C ₃₀ -32	2,03	24,31	12,88	8,97	1,89	20,49
	C ₃₀ -33	1,98	24,45	12,98	9,13	1,88	20,46
	C ₃₀ -34	2,15	24,55	13,16	9,52	1,87	
	C ₃₀ -35	1,98	25,18	13,41	9,18	1,88	
1000°C	C ₃₀ -41	2,08	24,01	12,45	9,57	1,93	71,92
	C ₃₀ -42	2,10	23,53	12,16	9,73	1,94	71,89
	C ₃₀ -43	2,15	23,78	12,43	9,56	1,91	71,89
	C ₃₀ -44	2,06	24,16	12,63	9,65	1,91	
	C ₃₀ -45	2,24	23,84	12,62	9,64	1,89	
1100°C	C ₃₀ -51	2,92	14,54	7,13	9,86	2,04	75,32
	C ₃₀ -52	2,93	14,48	7,37	9,56	1,96	75,36
	C ₃₀ -53	2,80	14,42	7,20	9,67	2,00	75,29
	C ₃₀ -54	2,72	16,02	7,98	9,60	2,01	
	C ₃₀ -55	2,84	15,78	8,12	9,72	1,94	
1200°C	C ₃₀ -61	*	*	*	*	*	*
	C ₃₀ -62	*	*	*	*	*	*
	C ₃₀ -63	*	*	*	*	*	*
	C ₃₀ -64	*	*	*	*	*	*
	C ₃₀ -65	*	*	*	*	*	*

* Amostra fundiu

ENSAIO DE RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA - RLq						ENSAIO DE POROSIDADE APARENTE - PA						ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA - AA					
Formulação	T (°C)	Código	RLq (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	PA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	AA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
C ₃₀	850	C ₃₀ -11	1,29	1,26	0,04	C ₃₀	850	C ₃₀ -11	28,35	28,07	0,59	C ₃₀	850	C ₃₀ -11	15,55	15,45	0,41
		C ₃₀ -12	1,27					C ₃₀ -12	27,59					C ₃₀ -12	15,04		
		C ₃₀ -13	1,25					C ₃₀ -13	28,10					C ₃₀ -13	15,53		
		C ₃₀ -14	1,19					C ₃₀ -14	27,43					C ₃₀ -14	15,08		
		C ₃₀ -15	1,30					C ₃₀ -15	28,89					C ₃₀ -15	16,04		
	900	C ₃₀ -21	1,40	1,40	0,09		900	C ₃₀ -21	27,39	27,41	0,51		900	C ₃₀ -21	14,45	14,84	0,35
		C ₃₀ -22	1,55					C ₃₀ -22	26,80					C ₃₀ -22	14,60		
		C ₃₀ -23	1,40					C ₃₀ -23	27,50					C ₃₀ -23	15,04		
		C ₃₀ -24	1,30					C ₃₀ -24	27,19					C ₃₀ -24	14,82		
		C ₃₀ -25	1,35					C ₃₀ -25	28,20					C ₃₀ -25	15,32		
	950	C ₃₀ -31	2,13	2,05	0,08		950	C ₃₀ -31	25,23	24,74	0,43		950	C ₃₀ -31	13,37	13,16	0,23
		C ₃₀ -32	2,03					C ₃₀ -32	24,31					C ₃₀ -32	12,88		
		C ₃₀ -33	1,98					C ₃₀ -33	24,45					C ₃₀ -33	12,98		
		C ₃₀ -34	2,15					C ₃₀ -34	24,55					C ₃₀ -34	13,16		
		C ₃₀ -35	1,98					C ₃₀ -35	25,18					C ₃₀ -35	13,41		
	1000	C ₃₀ -41	2,08	2,12	0,07		1000	C ₃₀ -41	24,01	23,86	0,24		1000	C ₃₀ -41	12,45	12,46	0,19
		C ₃₀ -42	2,10					C ₃₀ -42	23,53					C ₃₀ -42	12,16		
		C ₃₀ -43	2,15					C ₃₀ -43	23,78					C ₃₀ -43	12,43		
		C ₃₀ -44	2,06					C ₃₀ -44	24,16					C ₃₀ -44	12,63		
		C ₃₀ -45	2,24					C ₃₀ -45	23,84					C ₃₀ -45	12,62		
	1100	C ₃₀ -51	2,92	2,84	0,09		1100	C ₃₀ -51	14,54	15,05	0,78		1100	C ₃₀ -51	7,13	7,56	0,46
		C ₃₀ -52	2,93					C ₃₀ -52	14,48					C ₃₀ -52	7,37		
		C ₃₀ -53	2,80					C ₃₀ -53	14,42					C ₃₀ -53	7,20		
		C ₃₀ -54	2,72					C ₃₀ -54	16,02					C ₃₀ -54	7,98		
		C ₃₀ -55	2,84					C ₃₀ -55	15,78					C ₃₀ -55	8,12		
1200	C ₃₀ -61	*	*	*	1200	C ₃₀ -61	*	*	*	1200	C ₃₀ -61	*	*	*			
	C ₃₀ -62	*				C ₃₀ -62	*				C ₃₀ -62	*					
	C ₃₀ -63	*				C ₃₀ -63	*				C ₃₀ -63	*					
	C ₃₀ -64	*				C ₃₀ -64	*				C ₃₀ -64	*					
	C ₃₀ -65	*				C ₃₀ -65	*				C ₃₀ -65	*					

* Amostra fundiu

ENSAIO DE PERDA AO FOGO - PF						ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE - MEA						ENSAIO DE TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO - TRF					
Formulação	T (°C)	Código	PF (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	MEA (g/cm ³)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	TRF (MPa)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
C ₃₀	850	C ₃₀ -11	9,73	9,54	0,22	C ₃₀	850	C ₃₀ -11	1,82	1,82	0,01	C ₃₀	850	C ₃₀ -11	13,24	12,96	0,55
		C ₃₀ -12	9,45					C ₃₀ -12	1,83					C ₃₀ -12	13,31		
		C ₃₀ -13	9,67					C ₃₀ -13	1,81					C ₃₀ -13	12,33		
		C ₃₀ -14	9,19					C ₃₀ -14	1,82					C ₃₀ -14			
		C ₃₀ -15	9,64					C ₃₀ -15	1,80					C ₃₀ -15			
	900	C ₃₀ -21	8,20	8,31	0,17		900	C ₃₀ -21	1,90	1,85	0,03		900	C ₃₀ -21	13,10	13,58	0,41
		C ₃₀ -22	8,55					C ₃₀ -22	1,84					C ₃₀ -22	13,82		
		C ₃₀ -23	8,42					C ₃₀ -23	1,83					C ₃₀ -23	13,81		
		C ₃₀ -24	8,25					C ₃₀ -24	1,84					C ₃₀ -24			
		C ₃₀ -25	8,13					C ₃₀ -25	1,84					C ₃₀ -25			
	950	C ₃₀ -31	9,05	9,17	0,21		950	C ₃₀ -31	1,89	1,88	0,01		950	C ₃₀ -31	16,21	19,05	2,46
		C ₃₀ -32	8,97					C ₃₀ -32	1,89					C ₃₀ -32	20,49		
		C ₃₀ -33	9,13					C ₃₀ -33	1,88					C ₃₀ -33	20,46		
		C ₃₀ -34	9,52					C ₃₀ -34	1,87					C ₃₀ -34			
		C ₃₀ -35	9,18					C ₃₀ -35	1,88					C ₃₀ -35			
	1000	C ₃₀ -41	9,57	9,63	0,07		1000	C ₃₀ -41	1,93	1,92	0,02		1000	C ₃₀ -41	71,92	71,90	0,02
		C ₃₀ -42	9,73					C ₃₀ -42	1,94					C ₃₀ -42	71,89		
		C ₃₀ -43	9,56					C ₃₀ -43	1,91					C ₃₀ -43	71,89		
		C ₃₀ -44	9,65					C ₃₀ -44	1,91					C ₃₀ -44			
		C ₃₀ -45	9,64					C ₃₀ -45	1,89					C ₃₀ -45			
	1100	C ₃₀ -51	9,86	9,68	0,12		1100	C ₃₀ -51	2,04	1,99	0,04		1100	C ₃₀ -51	75,32	75,32	0,04
		C ₃₀ -52	9,56					C ₃₀ -52	1,96					C ₃₀ -52	75,36		
		C ₃₀ -53	9,67					C ₃₀ -53	2,00					C ₃₀ -53	75,29		
		C ₃₀ -54	9,60					C ₃₀ -54	2,01					C ₃₀ -54			
		C ₃₀ -55	9,72					C ₃₀ -55	1,94					C ₃₀ -55			
1200	C ₃₀ -61	*	*	*	1200	C ₃₀ -61	*	*	*	1200	C ₃₀ -61	*	*	*			
	C ₃₀ -62	*				C ₃₀ -62	*				C ₃₀ -62	*					
	C ₃₀ -63	*				C ₃₀ -63	*				C ₃₀ -63	*					
	C ₃₀ -64	*				C ₃₀ -64	*				C ₃₀ -64	*					
	C ₃₀ -65	*				C ₃₀ -65	*				C ₃₀ -65	*					

* Amostra fundiu

5 - Ensaios Tecnológicos de Propriedades Físico-Mecânicas – FORMULAÇÃO C₄₀

	Amostras	MEDIDAS ANTES DA QUEIMA			MEDIDAS APÓS A QUEIMA				
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Massa úmida (g) - 24h	Massa imersa (g)
850°C	C ₄₀ -11	60,72	20,22	11,65	60,20	20,03	10,66	12,31	6,51
	C ₄₀ -12	60,70	20,22	11,62	60,18	19,95	10,65	12,25	6,56
	C ₄₀ -13	60,70	20,22	11,63	60,18	19,93	10,68	12,25	6,55
	C ₄₀ -14	60,72	20,21	11,64	60,18	19,92	10,67	12,26	6,45
	C ₄₀ -15	60,72	20,22	11,65	60,16	19,92	10,67	12,28	6,55
900°C	C ₄₀ -21	60,66	20,11	11,44	60,06	19,98	10,61	12,18	6,34
	C ₄₀ -22	60,66	20,21	11,45	60,14	19,99	10,60	12,19	6,34
	C ₄₀ -23	60,70	20,18	11,45	60,05	19,91	10,63	12,16	6,35
	C ₄₀ -24	60,67	20,22	11,40	60,09	19,98	10,57	12,14	6,33
	C ₄₀ -25	60,69	20,21	11,50	60,08	19,99	10,65	12,22	6,42
950°C	C ₄₀ -31	60,61	20,07	11,36	59,91	19,82	10,43	11,86	6,21
	C ₄₀ -32	60,60	20,04	11,38	59,90	19,83	10,42	11,87	6,25
	C ₄₀ -33	60,57	20,03	11,33	59,93	19,83	10,44	11,83	6,20
	C ₄₀ -34	60,58	20,03	11,33	59,93	19,83	10,38	11,82	6,27
	C ₄₀ -35	60,62	20,04	11,43	59,87	19,81	10,46	11,90	6,24
1000°C	C ₄₀ -41	60,63	20,08	11,39	59,93	19,85	10,38	11,90	6,22
	C ₄₀ -42	60,65	20,12	11,42	59,99	20,06	10,41	11,87	6,31
	C ₄₀ -43	60,62	20,08	11,42	59,97	20,00	10,42	11,88	6,27
	C ₄₀ -44	60,63	20,08	11,37	59,99	19,89	10,36	11,83	6,25
	C ₄₀ -45	60,67	20,10	11,41	60,01	19,89	10,42	11,89	6,29
1100°C	C ₄₀ -51	60,64	20,09	11,40	59,76	19,77	10,38	11,43	5,90
	C ₄₀ -52	60,65	20,08	11,39	59,72	19,74	10,39	11,34	5,72
	C ₄₀ -53	60,69	20,10	11,37	59,57	19,79	10,37	11,26	5,90
	C ₄₀ -54	60,66	20,08	11,43	59,57	19,76	10,42	11,33	5,94
	C ₄₀ -55	60,66	20,09	11,46	59,62	19,77	10,42	11,31	5,76
1200°C	C ₄₀ -61	60,68	20,13	11,47	*	*	*	*	*
	C ₄₀ -62	60,71	20,14	11,52	*	*	*	*	*
	C ₄₀ -63	60,70	20,11	11,50	*	*	*	*	*
	C ₄₀ -64	60,69	20,15	11,47	*	*	*	*	*
	C ₄₀ -65	60,72	20,07	11,51	*	*	*	*	*

* Amostra fundiu

		$RLq = \frac{Cs - Cq}{Cq} \times 100$	$PA = \frac{Mu - Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$AA = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100$	$PF = \frac{Ms - Mq}{Mq} \times 100$	$MEA = \frac{Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$TRF = \frac{3PL}{2bh^2}$
	Amostras	RL (%)	PA (%)	AA (%)	PF (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (MPa)
850°C	C ₄₀ -11	0,86	28,45	15,48	8,50	1,84	10,93
	C ₄₀ -12	0,86	28,12	15,02	8,35	1,87	10,94
	C ₄₀ -13	0,86	27,54	14,70	8,17	1,87	11,11
	C ₄₀ -14	0,89	27,37	14,90	8,33	1,84	
	C ₄₀ -15	0,92	28,10	15,09	8,41	1,86	
900°C	C ₄₀ -21	0,99	26,88	14,80	7,26	1,82	10,41
	C ₄₀ -22	0,86	27,18	15,00	7,42	1,81	10,42
	C ₄₀ -23	1,07	26,33	14,39	7,16	1,83	10,51
	C ₄₀ -24	0,96	27,02	14,85	7,28	1,82	
	C ₄₀ -25	1,01	27,07	14,74	7,39	1,84	
950°C	C ₄₀ -31	1,15	25,31	13,71	8,19	1,85	10,21
	C ₄₀ -32	1,16	25,80	13,92	8,44	1,85	10,39
	C ₄₀ -33	1,06	24,69	13,31	7,86	1,85	10,32
	C ₄₀ -34	1,07	25,95	13,87	8,38	1,87	
	C ₄₀ -35	1,24	25,44	13,77	8,49	1,85	
1000°C	C ₄₀ -41	1,15	26,76	14,64	8,87	1,83	84,25
	C ₄₀ -42	1,09	26,26	14,02	8,84	1,87	83,39
	C ₄₀ -43	1,07	26,02	14,01	8,76	1,86	84,23
	C ₄₀ -44	1,06	26,34	14,19	8,88	1,86	
	C ₄₀ -45	1,09	26,25	14,11	8,68	1,86	
1100°C	C ₄₀ -51	1,45	18,99	10,12	8,95	1,88	84,99
	C ₄₀ -52	1,53	16,90	9,14	8,78	1,85	85,01
	C ₄₀ -53	1,85	16,60	8,58	8,80	1,93	84,93
	C ₄₀ -54	1,80	16,88	8,73	8,84	1,93	
	C ₄₀ -55	1,71	16,04	8,54	9,08	1,88	
1200°C	C ₄₀ -61	*	*	*	*	*	*
	C ₄₀ -62	*	*	*	*	*	*
	C ₄₀ -63	*	*	*	*	*	*
	C ₄₀ -64	*	*	*	*	*	*
	C ₄₀ -65	*	*	*	*	*	*

* Amostra fundiu

ENSAIO DE RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA - RLq					ENSAIO DE POROSIDADE APARENTE - PA					ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA - AA							
Formulação	T (°C)	Código	RLq (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	PA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	AA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
C ₄₀	850	C ₄₀₋₁₁	0,86	0,88	0,03	C ₄₀	850	C ₄₀₋₁₁	28,45	27,92	0,45	C ₄₀	850	C ₄₀₋₁₁	15,48	15,04	0,29
		C ₄₀₋₁₂	0,86					C ₄₀₋₁₂	28,12					C ₄₀₋₁₂	15,02		
		C ₄₀₋₁₃	0,86					C ₄₀₋₁₃	27,54					C ₄₀₋₁₃	14,70		
		C ₄₀₋₁₄	0,89					C ₄₀₋₁₄	27,37					C ₄₀₋₁₄	14,90		
		C ₄₀₋₁₅	0,92					C ₄₀₋₁₅	28,10					C ₄₀₋₁₅	15,09		
	900	C ₄₀₋₂₁	0,99	0,98	0,08		900	C ₄₀₋₂₁	26,88	26,90	0,33		900	C ₄₀₋₂₁	14,80	14,76	0,23
		C ₄₀₋₂₂	0,86					C ₄₀₋₂₂	27,18					C ₄₀₋₂₂	15,00		
		C ₄₀₋₂₃	1,07					C ₄₀₋₂₃	26,33					C ₄₀₋₂₃	14,39		
		C ₄₀₋₂₄	0,96					C ₄₀₋₂₄	27,02					C ₄₀₋₂₄	14,85		
		C ₄₀₋₂₅	1,01					C ₄₀₋₂₅	27,07					C ₄₀₋₂₅	14,74		
	950	C ₄₀₋₃₁	1,15	1,14	0,07		950	C ₄₀₋₃₁	25,31	25,44	0,49		950	C ₄₀₋₃₁	13,71	13,72	0,24
		C ₄₀₋₃₂	1,16					C ₄₀₋₃₂	25,80					C ₄₀₋₃₂	13,92		
		C ₄₀₋₃₃	1,06					C ₄₀₋₃₃	24,69					C ₄₀₋₃₃	13,31		
		C ₄₀₋₃₄	1,07					C ₄₀₋₃₄	25,95					C ₄₀₋₃₄	13,87		
		C ₄₀₋₃₅	1,24					C ₄₀₋₃₅	25,44					C ₄₀₋₃₅	13,77		
	1000	C ₄₀₋₄₁	1,15	1,09	0,04		1000	C ₄₀₋₄₁	26,76	26,33	0,27		1000	C ₄₀₋₄₁	14,64	14,20	0,26
		C ₄₀₋₄₂	1,09					C ₄₀₋₄₂	26,26					C ₄₀₋₄₂	14,02		
		C ₄₀₋₄₃	1,07					C ₄₀₋₄₃	26,02					C ₄₀₋₄₃	14,01		
		C ₄₀₋₄₄	1,06					C ₄₀₋₄₄	26,34					C ₄₀₋₄₄	14,19		
		C ₄₀₋₄₅	1,09					C ₄₀₋₄₅	26,25					C ₄₀₋₄₅	14,11		
	1100	C ₄₀₋₅₁	1,45	1,67	0,17		1100	C ₄₀₋₅₁	18,99	17,08	1,12		1100	C ₄₀₋₅₁	10,12	9,02	0,66
		C ₄₀₋₅₂	1,53					C ₄₀₋₅₂	16,90					C ₄₀₋₅₂	9,14		
		C ₄₀₋₅₃	1,85					C ₄₀₋₅₃	16,60					C ₄₀₋₅₃	8,58		
		C ₄₀₋₅₄	1,80					C ₄₀₋₅₄	16,88					C ₄₀₋₅₄	8,73		
		C ₄₀₋₅₅	1,71					C ₄₀₋₅₅	16,04					C ₄₀₋₅₅	8,54		
1200	C ₄₀₋₆₁	*	*	*	1200	C ₄₀₋₆₁	*	*	*	1200	C ₄₀₋₆₁	*	*	*			
	C ₄₀₋₆₂	*				C ₄₀₋₆₂	*				C ₄₀₋₆₂	*					
	C ₄₀₋₆₃	*				C ₄₀₋₆₃	*				C ₄₀₋₆₃	*					
	C ₄₀₋₆₄	*				C ₄₀₋₆₄	*				C ₄₀₋₆₄	*					
	C ₄₀₋₆₅	*				C ₄₀₋₆₅	*				C ₄₀₋₆₅	*					

* Amostra fundiu

ENSAIO DE PERDA AO FOGO - PF					ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE - MEA					ENSAIO DE TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO - TRF							
Formulação	T (°C)	Código	PF (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	MEA (g/cm ³)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	TRF (MPa)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
C ₄₀	850	C ₄₀₋₁₁	8,50	8,35	0,12	C ₄₀	850	C ₄₀₋₁₁	1,84	1,86	0,02	C ₄₀	850	C ₄₀₋₁₁	10,93	10,99	0,10
		C ₄₀₋₁₂	8,35					C ₄₀₋₁₂	1,87					C ₄₀₋₁₂	10,94		
		C ₄₀₋₁₃	8,17					C ₄₀₋₁₃	1,87					C ₄₀₋₁₃	11,11		
		C ₄₀₋₁₄	8,33					C ₄₀₋₁₄	1,84					C ₄₀₋₁₄			
		C ₄₀₋₁₅	8,41					C ₄₀₋₁₅	1,86					C ₄₀₋₁₅			
	900	C ₄₀₋₂₁	7,26	7,30	0,11		900	C ₄₀₋₂₁	1,82	1,82	0,01		900	C ₄₀₋₂₁	10,41	10,45	0,06
		C ₄₀₋₂₂	7,42					C ₄₀₋₂₂	1,81					C ₄₀₋₂₂	10,42		
		C ₄₀₋₂₃	7,16					C ₄₀₋₂₃	1,83					C ₄₀₋₂₃	10,51		
		C ₄₀₋₂₄	7,28					C ₄₀₋₂₄	1,82					C ₄₀₋₂₄			
		C ₄₀₋₂₅	7,39					C ₄₀₋₂₅	1,84					C ₄₀₋₂₅			
	950	C ₄₀₋₃₁	8,19	8,27	0,26		950	C ₄₀₋₃₁	1,85	1,85	0,01		950	C ₄₀₋₃₁	10,21	10,31	0,09
		C ₄₀₋₃₂	8,44					C ₄₀₋₃₂	1,85					C ₄₀₋₃₂	10,39		
		C ₄₀₋₃₃	7,86					C ₄₀₋₃₃	1,85					C ₄₀₋₃₃	10,32		
		C ₄₀₋₃₄	8,38					C ₄₀₋₃₄	1,87					C ₄₀₋₃₄			
		C ₄₀₋₃₅	8,49					C ₄₀₋₃₅	1,85					C ₄₀₋₃₅			
	1000	C ₄₀₋₄₁	8,87	8,81	0,09		1000	C ₄₀₋₄₁	1,83	1,85	0,02		1000	C ₄₀₋₄₁	84,25	83,96	0,49
		C ₄₀₋₄₂	8,84					C ₄₀₋₄₂	1,87					C ₄₀₋₄₂	83,39		
		C ₄₀₋₄₃	8,76					C ₄₀₋₄₃	1,86					C ₄₀₋₄₃	84,23		
		C ₄₀₋₄₄	8,88					C ₄₀₋₄₄	1,86					C ₄₀₋₄₄			
		C ₄₀₋₄₅	8,68					C ₄₀₋₄₅	1,86					C ₄₀₋₄₅			
	1100	C ₄₀₋₅₁	8,95	8,89	0,12		1100	C ₄₀₋₅₁	1,88	1,89	0,04		1100	C ₄₀₋₅₁	84,99	84,98	0,04
		C ₄₀₋₅₂	8,78					C ₄₀₋₅₂	1,85					C ₄₀₋₅₂	85,01		
		C ₄₀₋₅₃	8,80					C ₄₀₋₅₃	1,93					C ₄₀₋₅₃	84,93		
		C ₄₀₋₅₄	8,84					C ₄₀₋₅₄	1,93					C ₄₀₋₅₄			
		C ₄₀₋₅₅	9,08					C ₄₀₋₅₅	1,88					C ₄₀₋₅₅			
1200	C ₄₀₋₆₁	*	*	*	1200	C ₄₀₋₆₁	*	*	*	1200	C ₄₀₋₆₁	*	*	*			
	C ₄₀₋₆₂	*				C ₄₀₋₆₂	*				C ₄₀₋₆₂	*					
	C ₄₀₋₆₃	*				C ₄₀₋₆₃	*				C ₄₀₋₆₃	*					
	C ₄₀₋₆₄	*				C ₄₀₋₆₄	*				C ₄₀₋₆₄	*					
	C ₄₀₋₆₅	*				C ₄₀₋₆₅	*				C ₄₀₋₆₅	*					

* Amostra fundiu

6 - Ensaio Tecnológico de Propriedades Físico-Mecânicas – FORMULAÇÃO C₅₀

	Amostras	MEDIDAS ANTES DA QUEIMA			MEDIDAS APÓS A QUEIMA				
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Massa úmida (g) - 24h	Massa imersa (g)
850°C	C ₅₀ -11	60,74	20,22	11,70	60,37	19,98	10,80	12,36	6,58
	C ₅₀ -12	60,71	20,22	11,67	60,36	19,97	10,76	12,34	6,54
	C ₅₀ -13	60,71	20,22	11,68	60,33	19,97	10,85	12,43	6,62
	C ₅₀ -14	60,74	20,22	11,61	60,37	20,06	10,86	12,35	6,63
	C ₅₀ -15	60,74	20,23	11,60	60,40	20,00	10,82	12,38	6,61
900°C	C ₅₀ -21	60,70	20,21	11,50	60,32	20,16	10,76	12,35	6,50
	C ₅₀ -22	60,74	20,18	11,49	60,32	19,97	10,78	12,29	6,57
	C ₅₀ -23	60,72	20,12	11,54	60,31	20,16	10,76	12,36	6,51
	C ₅₀ -24	60,70	20,14	11,48	60,30	19,99	10,74	12,29	6,53
	C ₅₀ -25	60,73	20,12	11,52	60,30	19,98	10,74	12,29	6,55
950°C	C ₅₀ -31	60,71	20,07	11,43	60,27	20,11	10,60	12,14	6,43
	C ₅₀ -32	60,62	20,08	11,44	60,27	20,06	10,57	12,14	6,40
	C ₅₀ -33	60,64	20,07	11,43	60,28	20,13	10,59	12,19	6,39
	C ₅₀ -34	60,60	20,05	11,51	60,23	20,08	10,63	12,23	6,41
	C ₅₀ -35	60,67	20,05	11,38	60,20	19,94	10,56	12,17	6,37
1000°C	C ₅₀ -41	60,67	20,13	11,40	60,36	20,11	10,51	12,08	6,37
	C ₅₀ -42	60,69	20,09	11,46	60,37	20,09	10,56	12,10	6,38
	C ₅₀ -43	60,68	20,12	11,49	60,37	20,03	10,62	12,13	6,40
	C ₅₀ -44	60,68	20,10	11,46	60,33	20,00	10,54	12,12	6,42
	C ₅₀ -45	60,70	20,13	11,42	60,40	20,02	10,50	12,08	6,30
1100°C	C ₅₀ -51	60,64	20,13	11,50	59,55	19,84	10,57	10,87	5,80
	C ₅₀ -52	60,65	20,10	11,45	59,66	19,85	10,52	10,93	5,80
	C ₅₀ -53	60,69	20,19	11,52	59,51	19,90	10,59	11,01	5,83
	C ₅₀ -54	60,66	20,17	11,47	59,83	19,91	10,54	11,11	5,90
	C ₅₀ -55	60,68	20,10	11,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1200°C	C ₅₀ -61	60,70	20,12	11,56	*	*	*	*	*
	C ₅₀ -62	60,70	20,10	11,55	*	*	*	*	*
	C ₅₀ -63	60,68	20,16	11,53	*	*	*	*	*
	C ₅₀ -64	60,71	20,13	11,56	*	*	*	*	*
	C ₅₀ -65	60,70	20,10	11,58	*	*	*	*	*

* Amostra fundiu

	Amostras	$RLq = \frac{Cs - Cq}{Cq} \times 100$	$PA = \frac{Mu - Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$AA = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100$	$PF = \frac{Ms - Mq}{Mq} \times 100$	$MEA = \frac{Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$TRF = \frac{3PL}{2bh^2}$
		RL (%)	PA (%)	AA (%)	PF (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (MPa)
850°C	C ₅₀ -11	0,61	26,99	14,44	7,69	1,87	6,09
	C ₅₀ -12	0,58	27,24	14,68	7,80	1,86	6,11
	C ₅₀ -13	0,63	27,19	14,56	7,11	1,87	6,18
	C ₅₀ -14	0,61	26,05	13,72	6,46	1,90	
	C ₅₀ -15	0,56	27,04	14,42	6,72	1,88	
900°C	C ₅₀ -21	0,63	27,18	14,78	6,43	1,84	8,43
	C ₅₀ -22	0,69	26,40	14,01	6,18	1,88	8,25
	C ₅₀ -23	0,68	27,35	14,87	6,76	1,84	8,31
	C ₅₀ -24	0,66	26,91	14,43	6,45	1,86	
	C ₅₀ -25	0,71	27,00	14,43	6,77	1,87	
950°C	C ₅₀ -31	0,72	26,97	14,53	7,26	1,86	8,22
	C ₅₀ -32	0,58	27,35	14,85	7,60	1,84	7,8
	C ₅₀ -33	0,59	27,59	15,11	7,35	1,83	7,86
	C ₅₀ -34	0,61	27,49	15,05	7,65	1,83	
	C ₅₀ -35	0,77	27,76	15,25	7,21	1,82	
1000°C	C ₅₀ -41	0,51	27,50	14,94	7,81	1,84	89,29
	C ₅₀ -42	0,53	26,92	14,58	7,85	1,85	90,01
	C ₅₀ -43	0,51	26,35	14,22	7,57	1,85	90,08
	C ₅₀ -44	0,58	27,72	14,99	8,03	1,85	
	C ₅₀ -45	0,49	27,34	15,05	8,06	1,82	
1100°C	C ₅₀ -51	1,80	5,92	2,84	8,09	2,08	90,33
	C ₅₀ -52	1,63	7,99	3,90	8,12	2,05	90,41
	C ₅₀ -53	1,94	8,11	3,97	8,07	2,04	90,41
	C ₅₀ -54	1,37	10,94	5,41	8,11	2,02	
	C ₅₀ -55	0,00	0,00	0,00	0	0	
1200°C	C ₅₀ -61	*	*	*	*	*	*
	C ₅₀ -62	*	*	*	*	*	*
	C ₅₀ -63	*	*	*	*	*	*
	C ₅₀ -64	*	*	*	*	*	*
	C ₅₀ -65	*	*	*	*	*	*

* Amostra fundiu

ENSAIO DE RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA - RLq						ENSAIO DE POROSIDADE APARENTE - PA						ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA - AA					
Formulação	T (°C)	Código	RLq (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	PA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	AA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
C ₅₀	850	C ₅₀ -11	0,61	0,60	0,03	C ₅₀	850	C ₅₀ -11	26,99	26,90	0,49	C ₅₀	850	C ₅₀ -11	14,44	14,37	0,38
		C ₅₀ -12	0,58					C ₅₀ -12	27,24					C ₅₀ -12	14,68		
		C ₅₀ -13	0,63					C ₅₀ -13	27,19					C ₅₀ -13	14,56		
		C ₅₀ -14	0,61					C ₅₀ -14	26,05					C ₅₀ -14	13,72		
		C ₅₀ -15	0,56					C ₅₀ -15	27,04					C ₅₀ -15	14,42		
	900	C ₅₀ -21	0,63	0,67	0,03		900	C ₅₀ -21	27,18	26,97	0,36		900	C ₅₀ -21	14,78	14,50	0,34
		C ₅₀ -22	0,69					C ₅₀ -22	26,40					C ₅₀ -22	14,01		
		C ₅₀ -23	0,68					C ₅₀ -23	27,35					C ₅₀ -23	14,87		
		C ₅₀ -24	0,66					C ₅₀ -24	26,91					C ₅₀ -24	14,43		
		C ₅₀ -25	0,71					C ₅₀ -25	27,00					C ₅₀ -25	14,43		
	950	C ₅₀ -31	0,72	0,66	0,09		950	C ₅₀ -31	26,97	27,43	0,30		950	C ₅₀ -31	14,53	14,96	0,28
		C ₅₀ -32	0,58					C ₅₀ -32	27,35					C ₅₀ -32	14,85		
		C ₅₀ -33	0,59					C ₅₀ -33	27,59					C ₅₀ -33	15,11		
		C ₅₀ -34	0,61					C ₅₀ -34	27,49					C ₅₀ -34	15,05		
		C ₅₀ -35	0,77					C ₅₀ -35	27,76					C ₅₀ -35	15,25		
	1000	C ₅₀ -41	0,51	0,52	0,03		1000	C ₅₀ -41	27,50	27,17	0,54		1000	C ₅₀ -41	14,94	14,76	0,35
		C ₅₀ -42	0,53					C ₅₀ -42	26,92					C ₅₀ -42	14,58		
		C ₅₀ -43	0,51					C ₅₀ -43	26,35					C ₅₀ -43	14,22		
		C ₅₀ -44	0,58					C ₅₀ -44	27,72					C ₅₀ -44	14,99		
		C ₅₀ -45	0,49					C ₅₀ -45	27,34					C ₅₀ -45	15,05		
	1100	C ₅₀ -51	1,80	1,35	0,78		1100	C ₅₀ -51	5,92	6,59	4,10		1100	C ₅₀ -51	2,84	3,22	2,02
		C ₅₀ -52	1,63					C ₅₀ -52	7,99					C ₅₀ -52	3,90		
		C ₅₀ -53	1,94					C ₅₀ -53	8,11					C ₅₀ -53	3,97		
		C ₅₀ -54	1,37					C ₅₀ -54	10,94					C ₅₀ -54	5,41		
		C ₅₀ -55	0,00					C ₅₀ -55	0,00					C ₅₀ -55	0,00		
	1200	C ₅₀ -61	*	*	*		1200	C ₅₀ -61	*	*	*		1200	C ₅₀ -61	*	*	*
		C ₅₀ -62	*					C ₅₀ -62	*					C ₅₀ -62	*		
		C ₅₀ -63	*					C ₅₀ -63	*					C ₅₀ -63	*		
		C ₅₀ -64	*					C ₅₀ -64	*					C ₅₀ -64	*		
		C ₅₀ -65	*					C ₅₀ -65	*					C ₅₀ -65	*		

* Amostra fundiu

ENSAIO DE PERDA AO FOGO - PF						ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE - MEA						ENSAIO DE TENSÃO DE RUPTURA à FLEXÃO - TRF					
Formulação	T (°C)	Código	PF (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	MEA (g/cm ³)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	TRF (MPa)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
C ₅₀	850	C ₅₀ -11	7,69	7,16	0,59	C ₅₀	850	C ₅₀ -11	1,87	1,87	0,02	C ₅₀	850	C ₅₀ -11	6,09	6,13	0,05
		C ₅₀ -12	7,80					C ₅₀ -12	1,86					C ₅₀ -12	6,11		
		C ₅₀ -13	7,11					C ₅₀ -13	1,87					C ₅₀ -13	6,18		
		C ₅₀ -14	6,46					C ₅₀ -14	1,90					C ₅₀ -14			
		C ₅₀ -15	6,72					C ₅₀ -15	1,88					C ₅₀ -15			
	900	C ₅₀ -21	6,43	6,52	0,25		900	C ₅₀ -21	1,84	1,86	0,02		900	C ₅₀ -21	8,43	8,33	0,09
		C ₅₀ -22	6,18					C ₅₀ -22	1,88					C ₅₀ -22	8,25		
		C ₅₀ -23	6,76					C ₅₀ -23	1,84					C ₅₀ -23	8,31		
		C ₅₀ -24	6,45					C ₅₀ -24	1,86					C ₅₀ -24			
		C ₅₀ -25	6,77					C ₅₀ -25	1,87					C ₅₀ -25			
	950	C ₅₀ -31	7,26	7,41	0,20		950	C ₅₀ -31	1,86	1,83	0,01		950	C ₅₀ -31	8,22	7,96	0,23
		C ₅₀ -32	7,60					C ₅₀ -32	1,84					C ₅₀ -32	7,80		
		C ₅₀ -33	7,35					C ₅₀ -33	1,83					C ₅₀ -33	7,86		
		C ₅₀ -34	7,65					C ₅₀ -34	1,83					C ₅₀ -34			
		C ₅₀ -35	7,21					C ₅₀ -35	1,82					C ₅₀ -35			
	1000	C ₅₀ -41	7,81	7,86	0,20		1000	C ₅₀ -41	1,84	1,84	0,01		1000	C ₅₀ -41	89,29	89,79	0,44
		C ₅₀ -42	7,85					C ₅₀ -42	1,85					C ₅₀ -42	90,01		
		C ₅₀ -43	7,57					C ₅₀ -43	1,85					C ₅₀ -43	90,08		
		C ₅₀ -44	8,03					C ₅₀ -44	1,85					C ₅₀ -44			
		C ₅₀ -45	8,06					C ₅₀ -45	1,82					C ₅₀ -45			
	1100	C ₅₀ -51	8,09	6,48	3,62		1100	C ₅₀ -51	2,08	1,64	0,92		1100	C ₅₀ -51	90,33	90,38	0,05
		C ₅₀ -52	8,12					C ₅₀ -52	2,05					C ₅₀ -52	90,41		
		C ₅₀ -53	8,07					C ₅₀ -53	2,04					C ₅₀ -53	90,41		
		C ₅₀ -54	8,11					C ₅₀ -54	2,02					C ₅₀ -54			
		C ₅₀ -55	0,00					C ₅₀ -55	0,00					C ₅₀ -55			
	1200	C ₅₀ -61	*	*	*		1200	C ₅₀ -61	*	*	*		1200	C ₅₀ -61	*	*	*
		C ₅₀ -62	*					C ₅₀ -62	*					C ₅₀ -62	*		
		C ₅₀ -63	*					C ₅₀ -63	*					C ₅₀ -63	*		
		C ₅₀ -64	*					C ₅₀ -64	*					C ₅₀ -64	*		
		C ₅₀ -65	*					C ₅₀ -65	*					C ₅₀ -65	*		

* Amostra fundiu

7 - Ensaios Tecnológicos de Propriedades Físico-Mecânicas – FORMULAÇÃO S₁₀

	Amostras	MEDIDAS ANTES DA QUEIMA			MEDIDAS APÓS A QUEIMA				
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Massa úmida (g) - 24h	Massa imersa (g)
850°C	S ₁₀ -11	60,70	20,23	11,76	58,97	19,61	10,26	12,24	6,35
	S ₁₀ -12	60,71	20,11	11,67	58,91	19,48	10,17	12,10	6,31
	S ₁₀ -13	60,70	20,15	11,75	58,90	19,48	10,28	12,28	6,26
	S ₁₀ -14	60,69	20,24	11,73	58,98	19,58	10,25	12,14	6,31
	S ₁₀ -15	60,64	20,25	11,61	58,90	19,61	10,17	12,10	6,18
900°C	S ₁₀ -21	60,61	20,08	11,21	58,97	19,59	10,11	11,84	6,18
	S ₁₀ -22	60,61	20,06	11,21	58,90	19,66	10,11	11,84	6,06
	S ₁₀ -23	60,60	20,07	11,22	58,94	19,65	10,12	11,85	6,18
	S ₁₀ -24	60,56	20,05	11,14	58,85	19,59	10,05	11,76	5,94
	S ₁₀ -25	60,60	20,11	11,21	58,98	19,77	10,11	11,85	5,94
950°C	S ₁₀ -31	60,60	20,10	11,19	58,63	19,41	10,10	11,72	6,21
	S ₁₀ -32	60,54	20,06	11,13	58,57	19,37	10,01	11,72	6,09
	S ₁₀ -33	60,56	20,05	11,14	58,44	19,33	10,01	11,67	6,09
	S ₁₀ -34	60,58	20,06	11,21	58,42	19,32	10,09	11,71	6,12
	S ₁₀ -35	60,57	20,06	11,21	58,36	19,32	10,06	11,70	6,13
1000°C	S ₁₀ -41	60,57	20,07	11,19	56,78	18,74	10,04	11,13	5,97
	S ₁₀ -42	60,57	20,08	11,22	56,74	18,72	10,03	11,17	6,06
	S ₁₀ -43	60,55	20,08	11,18	56,71	18,69	9,98	11,07	6,04
	S ₁₀ -44	60,58	20,08	11,20	56,76	18,70	10,02	11,11	6,07
	S ₁₀ -45	60,57	20,08	11,15	56,72	18,71	10,00	11,06	6,09
1100°C	S ₁₀ -51	60,54	20,12	11,24	54,88	17,93	10,03	10,68	6,07
	S ₁₀ -52	60,55	20,09	11,19	54,85	17,90	10,00	10,62	6,05
	S ₁₀ -53	60,58	20,12	11,19	54,75	17,93	10,01	10,62	6,09
	S ₁₀ -54	60,55	20,06	11,26	54,79	17,88	10,04	10,66	6,06
	S ₁₀ -55	60,55	20,06	11,28	54,74	17,84	10,06	10,72	6,11
1200°C	S ₁₀ -61	60,30	19,74	11,35	53,83	17,73	10,01	10,28	6,08
	S ₁₀ -62	60,31	19,74	11,36	53,56	17,72	10,01	10,27	6,18
	S ₁₀ -63	60,29	19,76	11,38	53,52	17,71	10,08	10,23	6,05
	S ₁₀ -64	60,28	19,75	11,36	53,40	17,68	10,06	10,23	6,07
	S ₁₀ -65	60,34	19,74	11,33	53,34	17,67	10,01	10,16	6,05

		$RLq = \frac{Cs - Cq}{Cq} \times 100$	$PA = \frac{Mu - Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$AA = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100$	$PF = \frac{Ms - Mq}{Mq} \times 100$	$MEA = \frac{Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$TRF = \frac{3PL}{2bh^2}$
	Amostras	RL (%)	PA (%)	AA (%)	PF (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (MPa)
850°C	S ₁₀ -11	2,85	33,62	19,30	12,76	1,74	12,61
	S ₁₀ -12	2,96	33,33	18,98	12,85	1,76	12,82
	S ₁₀ -13	2,97	33,22	19,46	12,51	1,71	12,83
	S ₁₀ -14	2,82	32,42	18,44	12,62	1,76	
	S ₁₀ -15	2,87	32,60	18,98	12,40	1,72	
900°C	S ₁₀ -21	2,71	30,57	17,11	9,81	1,79	12,56
	S ₁₀ -22	2,82	29,93	17,11	9,81	1,75	12,68
	S ₁₀ -23	2,74	30,51	17,09	9,80	1,78	12,65
	S ₁₀ -24	2,82	29,38	17,01	9,78	1,73	
	S ₁₀ -25	2,67	29,44	17,21	9,81	1,71	
950°C	S ₁₀ -31	3,25	29,40	16,04	9,74	1,83	12,42
	S ₁₀ -32	3,25	30,37	17,08	10,06	1,78	12,54
	S ₁₀ -33	3,50	29,75	16,58	10,14	1,79	12,4
	S ₁₀ -34	3,57	28,98	16,06	9,99	1,81	
	S ₁₀ -35	3,65	29,44	16,30	10,26	1,81	
1000°C	S ₁₀ -41	6,26	21,12	10,86	10,28	1,95	34,31
	S ₁₀ -42	6,32	22,31	11,37	10,61	1,96	34,78
	S ₁₀ -43	6,34	21,67	10,92	10,73	1,98	34,66
	S ₁₀ -44	6,31	21,63	10,88	10,54	1,99	
	S ₁₀ -45	6,36	21,33	10,60	10,31	2,01	
1100°C	S ₁₀ -51	9,35	14,10	6,48	10,77	2,18	50,22
	S ₁₀ -52	9,41	13,57	6,20	10,63	2,19	50,54
	S ₁₀ -53	9,62	13,47	6,09	10,55	2,21	50,91
	S ₁₀ -54	9,51	13,48	6,18	10,83	2,18	
	S ₁₀ -55	9,60	14,32	6,56	10,82	2,18	
1200°C	S ₁₀ -61	10,73	6,43	2,70	11,81	2,38	60,3
	S ₁₀ -62	11,19	6,36	2,60	11,88	2,45	60,46
	S ₁₀ -63	11,23	3,59	1,49	11,42	2,41	60,42
	S ₁₀ -64	11,41	4,09	1,69	11,44	2,42	
	S ₁₀ -65	11,60	3,65	1,50	11,65	2,44	

ENSAIO DE RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA - RLq						ENSAIO DE POROSIDADE APARENTE - PA						ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA - AA					
Formulação	T (°C)	Código	RLq (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	PA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	AA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
S ₁₀	850	S ₁₀ -11	2,85	2,89	0,07	850	850	S ₁₀ -11	33,62	33,04	0,51	850	850	S ₁₀ -11	19,30	19,03	0,39
		S ₁₀ -12	2,96					S ₁₀ -12	33,33					S ₁₀ -12	18,98		
		S ₁₀ -13	2,97					S ₁₀ -13	33,22					S ₁₀ -13	19,46		
		S ₁₀ -14	2,82					S ₁₀ -14	32,42					S ₁₀ -14	18,44		
		S ₁₀ -15	2,87					S ₁₀ -15	32,60					S ₁₀ -15	18,98		
	900	S ₁₀ -21	2,71	2,75	0,07	900	900	S ₁₀ -21	30,57	29,97	0,56	900	900	S ₁₀ -21	17,11	17,11	0,07
		S ₁₀ -22	2,82					S ₁₀ -22	29,93					S ₁₀ -22	17,11		
		S ₁₀ -23	2,74					S ₁₀ -23	30,51					S ₁₀ -23	17,09		
		S ₁₀ -24	2,82					S ₁₀ -24	29,38					S ₁₀ -24	17,01		
		S ₁₀ -25	2,67					S ₁₀ -25	29,44					S ₁₀ -25	17,21		
	950	S ₁₀ -31	3,25	3,44	0,18	950	950	S ₁₀ -31	29,40	29,59	0,52	950	950	S ₁₀ -31	16,04	16,41	0,44
		S ₁₀ -32	3,25					S ₁₀ -32	30,37					S ₁₀ -32	17,08		
		S ₁₀ -33	3,50					S ₁₀ -33	29,75					S ₁₀ -33	16,58		
		S ₁₀ -34	3,57					S ₁₀ -34	28,98					S ₁₀ -34	16,06		
		S ₁₀ -35	3,65					S ₁₀ -35	29,44					S ₁₀ -35	16,30		
	1000	S ₁₀ -41	6,26	6,32	0,04	1000	1000	S ₁₀ -41	21,12	21,61	0,45	1000	1000	S ₁₀ -41	10,86	10,92	0,28
		S ₁₀ -42	6,32					S ₁₀ -42	22,31					S ₁₀ -42	11,37		
		S ₁₀ -43	6,34					S ₁₀ -43	21,67					S ₁₀ -43	10,92		
		S ₁₀ -44	6,31					S ₁₀ -44	21,63					S ₁₀ -44	10,88		
		S ₁₀ -45	6,36					S ₁₀ -45	21,33					S ₁₀ -45	10,60		
	1100	S ₁₀ -51	9,35	9,50	0,12	1100	1100	S ₁₀ -51	14,10	13,79	0,40	1100	1100	S ₁₀ -51	6,48	6,30	0,21
		S ₁₀ -52	9,41					S ₁₀ -52	13,57					S ₁₀ -52	6,20		
		S ₁₀ -53	9,62					S ₁₀ -53	13,47					S ₁₀ -53	6,09		
		S ₁₀ -54	9,51					S ₁₀ -54	13,48					S ₁₀ -54	6,18		
		S ₁₀ -55	9,60					S ₁₀ -55	14,32					S ₁₀ -55	6,56		
1200	S ₁₀ -61	10,73	11,23	0,33	1200	1200	S ₁₀ -61	6,43	4,82	1,45	1200	1200	S ₁₀ -61	2,70	1,99	0,60	
	S ₁₀ -62	11,19					S ₁₀ -62	6,36					S ₁₀ -62	2,60			
	S ₁₀ -63	11,23					S ₁₀ -63	3,59					S ₁₀ -63	1,49			
	S ₁₀ -64	11,41					S ₁₀ -64	4,09					S ₁₀ -64	1,69			
	S ₁₀ -65	11,60					S ₁₀ -65	3,65					S ₁₀ -65	1,50			

ENSAIO DE PERDA AO FOGO - PF						ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE - MEA						ENSAIO DE TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO - TRF					
Formulação	T (°C)	Código	PF (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	MEA (g/cm ³)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	TRF (MPa)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
S ₁₀	850	S ₁₀ -11	12,76	12,63	0,18	850	850	S ₁₀ -11	1,74	1,74	0,02	850	850	S ₁₀ -11	12,61	12,75	0,12
		S ₁₀ -12	12,85					S ₁₀ -12	1,76					S ₁₀ -12	12,82		
		S ₁₀ -13	12,51					S ₁₀ -13	1,71					S ₁₀ -13	12,83		
		S ₁₀ -14	12,62					S ₁₀ -14	1,76					S ₁₀ -14			
		S ₁₀ -15	12,40					S ₁₀ -15	1,72					S ₁₀ -15			
	900	S ₁₀ -21	9,81	9,81	0,01	900	900	S ₁₀ -21	1,79	1,75	0,03	900	900	S ₁₀ -21	12,56	12,63	0,06
		S ₁₀ -22	9,81					S ₁₀ -22	1,75					S ₁₀ -22	12,68		
		S ₁₀ -23	9,80					S ₁₀ -23	1,78					S ₁₀ -23	12,65		
		S ₁₀ -24	9,78					S ₁₀ -24	1,73					S ₁₀ -24			
		S ₁₀ -25	9,81					S ₁₀ -25	1,71					S ₁₀ -25			
	950	S ₁₀ -31	9,74	10,04	0,19	950	950	S ₁₀ -31	1,83	1,80	0,02	950	950	S ₁₀ -31	12,42	12,45	0,08
		S ₁₀ -32	10,06					S ₁₀ -32	1,78					S ₁₀ -32	12,54		
		S ₁₀ -33	10,14					S ₁₀ -33	1,79					S ₁₀ -33	12,40		
		S ₁₀ -34	9,99					S ₁₀ -34	1,81					S ₁₀ -34			
		S ₁₀ -35	10,26					S ₁₀ -35	1,81					S ₁₀ -35			
	1000	S ₁₀ -41	10,28	10,49	0,19	1000	1000	S ₁₀ -41	1,95	1,98	0,03	1000	1000	S ₁₀ -41	34,31	34,58	0,24
		S ₁₀ -42	10,61					S ₁₀ -42	1,96					S ₁₀ -42	34,78		
		S ₁₀ -43	10,73					S ₁₀ -43	1,98					S ₁₀ -43	34,66		
		S ₁₀ -44	10,54					S ₁₀ -44	1,99					S ₁₀ -44			
		S ₁₀ -45	10,31					S ₁₀ -45	2,01					S ₁₀ -45			
	1100	S ₁₀ -51	10,77	10,72	0,12	1100	1100	S ₁₀ -51	2,18	2,19	0,01	1100	1100	S ₁₀ -51	50,22	50,56	0,35
		S ₁₀ -52	10,63					S ₁₀ -52	2,19					S ₁₀ -52	50,54		
		S ₁₀ -53	10,55					S ₁₀ -53	2,21					S ₁₀ -53	50,91		
		S ₁₀ -54	10,83					S ₁₀ -54	2,18					S ₁₀ -54			
		S ₁₀ -55	10,82					S ₁₀ -55	2,18					S ₁₀ -55			
1200	S ₁₀ -61	11,81	11,64	0,21	1200	1200	S ₁₀ -61	2,38	2,42	0,02	1200	1200	S ₁₀ -61	60,30	60,39	0,08	
	S ₁₀ -62	11,88					S ₁₀ -62	2,45					S ₁₀ -62	60,46			
	S ₁₀ -63	11,42					S ₁₀ -63	2,41					S ₁₀ -63	60,42			
	S ₁₀ -64	11,44					S ₁₀ -64	2,42					S ₁₀ -64				
	S ₁₀ -65	11,65					S ₁₀ -65	2,44					S ₁₀ -65				

8 - Ensaios Tecnológicos de Propriedades Físico-Mecânicas – FORMULAÇÃO S₂₀

	Amostras	MEDIDAS ANTES DA QUEIMA			MEDIDAS APÓS A QUEIMA				
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Massa úmida (g) - 24h	Massa imersa (g)
850°C	S ₂₀ -11	61,07	20,33	11,56	59,79	19,85	10,27	12,10	6,27
	S ₂₀ -12	60,95	20,35	11,51	59,62	19,88	10,20	12,04	6,21
	S ₂₀ -13	60,79	20,20	11,77	59,56	19,80	10,33	12,28	6,38
	S ₂₀ -14	60,75	20,24	11,83	59,40	19,74	10,45	12,33	6,40
	S ₂₀ -15	60,83	20,23	11,80	59,44	19,75	10,43	12,38	6,39
900°C	S ₂₀ -21	60,70	20,11	11,28	59,36	19,73	10,26	11,98	6,30
	S ₂₀ -22	60,67	20,09	11,28	59,35	19,78	10,24	12,04	6,26
	S ₂₀ -23	60,60	20,12	11,22	59,26	19,64	10,20	11,94	6,18
	S ₂₀ -24	60,61	20,18	11,25	59,32	19,65	10,24	11,95	6,18
	S ₂₀ -25	60,70	20,08	11,29	59,33	19,66	10,28	12,02	6,22
950°C	S ₂₀ -31	60,59	20,08	11,23	58,62	19,37	10,16	11,72	6,22
	S ₂₀ -32	60,57	20,06	11,19	58,58	19,35	10,11	11,72	6,20
	S ₂₀ -33	60,57	20,06	11,23	58,67	19,43	10,15	11,73	6,27
	S ₂₀ -34	60,58	20,07	11,20	58,61	19,43	10,13	11,73	6,19
	S ₂₀ -35	60,59	20,10	11,21	58,66	19,43	10,15	11,73	6,21
1000°C	S ₂₀ -41	60,61	20,10	11,27	57,23	18,93	10,13	11,16	6,13
	S ₂₀ -42	60,60	20,07	11,25	57,27	18,92	10,12	11,19	6,10
	S ₂₀ -43	60,63	20,09	11,25	57,33	18,96	10,15	11,16	6,11
	S ₂₀ -44	60,61	20,17	11,30	57,42	19,04	10,16	11,26	6,16
	S ₂₀ -45	60,61	20,09	11,21	57,46	19,02	10,10	11,22	6,14
1100°C	S ₂₀ -51	60,59	20,07	11,32	55,93	18,26	10,12	10,98	6,09
	S ₂₀ -52	60,59	20,17	11,32	55,90	18,25	10,15	10,95	6,17
	S ₂₀ -53	60,60	20,07	11,31	55,95	18,25	10,14	10,92	6,15
	S ₂₀ -54	60,59	20,07	11,30	55,96	18,27	10,14	10,99	6,17
	S ₂₀ -55	60,58	20,07	11,38	55,91	18,27	10,16	10,98	6,18
1200°C	S ₂₀ -61	60,32	19,79	11,27	54,56	18,04	10,16	10,17	6,00
	S ₂₀ -62	60,27	19,77	11,33	54,47	18,08	10,14	10,14	6,01
	S ₂₀ -63	60,35	19,74	11,36	54,66	18,05	10,20	10,23	6,01
	S ₂₀ -64	60,33	19,76	11,27	54,61	18,09	10,13	10,14	5,99
	S ₂₀ -65	60,26	19,74	11,32	54,52	18,07	10,13	10,14	6,02

	Amostras	$RLq = \frac{Cs - Cq}{Cq} \times 100$	$PA = \frac{Mu - Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$AA = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100$	$PF = \frac{Ms - Mq}{Mq} \times 100$	$MEA = \frac{Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$TRF = \frac{3PL}{2bh^2}$
		RL (%)	PA (%)	AA (%)	PF (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (MPa)
850°C	S ₂₀ -11	2,10	31,39	17,82	11,16	1,76	12,85
	S ₂₀ -12	2,18	31,56	18,04	11,38	1,75	12,73
	S ₂₀ -13	2,02	33,05	18,88	12,23	1,75	12,86
	S ₂₀ -14	2,22	31,70	17,99	11,67	1,76	
	S ₂₀ -15	2,29	32,55	18,70	11,61	1,74	
900°C	S ₂₀ -21	2,21	30,28	16,76	9,04	1,81	12,92
	S ₂₀ -22	2,18	31,14	17,58	9,22	1,77	12,86
	S ₂₀ -23	2,21	30,21	17,06	9,09	1,77	12,83
	S ₂₀ -24	2,13	29,64	16,70	8,98	1,77	
	S ₂₀ -25	2,26	30,00	16,93	8,95	1,77	
950°C	S ₂₀ -31	3,25	28,36	15,35	9,53	1,85	13,72
	S ₂₀ -32	3,29	29,17	15,92	9,65	1,83	13,79
	S ₂₀ -33	3,14	28,94	15,57	9,62	1,86	13,66
	S ₂₀ -34	3,25	28,88	15,79	9,55	1,83	
	S ₂₀ -35	3,19	28,62	15,57	9,46	1,84	
1000°C	S ₂₀ -41	5,58	20,48	10,17	10,12	2,01	36,88
	S ₂₀ -42	5,50	21,02	10,57	10,04	1,99	36,79
	S ₂₀ -43	5,44	20,00	9,95	9,78	2,01	36,78
	S ₂₀ -44	5,26	21,57	10,83	10,09	1,99	
	S ₂₀ -45	5,20	22,05	11,09	9,90	1,99	
1100°C	S ₂₀ -51	7,69	17,59	8,50	10,60	2,07	54,21
	S ₂₀ -52	7,74	16,74	7,88	10,34	2,12	53,97
	S ₂₀ -53	7,67	16,35	7,69	10,34	2,13	54,18
	S ₂₀ -54	7,64	17,63	8,38	10,27	2,10	
	S ₂₀ -55	7,71	17,08	8,07	10,72	2,12	
1200°C	S ₂₀ -61	9,55	0,24	0,10	9,85	2,44	61,66
	S ₂₀ -62	9,62	0,00	0,00	10,50	2,46	62,48
	S ₂₀ -63	9,43	0,71	0,29	10,21	2,42	62,32
	S ₂₀ -64	9,48	0,24	0,10	10,12	2,44	
	S ₂₀ -65	9,53	0,24	0,10	10,51	2,46	

ENSAIO DE RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA - RLq						ENSAIO DE POROSIDADE APARENTE - PA						ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA- AA					
Formulação	T (°C)	Código	RLq (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	PA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	AA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
S ₂₀	850	S ₂₀ -11	2,10	2,16	0,10	S ₂₀	850	S ₂₀ -11	31,39	32,05	0,72	S ₂₀	850	S ₂₀ -11	17,82	18,28	0,47
		S ₂₀ -12	2,18					S ₂₀ -12	31,56					S ₂₀ -12	18,04		
		S ₂₀ -13	2,02					S ₂₀ -13	33,05					S ₂₀ -13	18,88		
		S ₂₀ -14	2,22					S ₂₀ -14	31,70					S ₂₀ -14	17,99		
		S ₂₀ -15	2,29					S ₂₀ -15	32,55					S ₂₀ -15	18,70		
	900	S ₂₀ -21	2,21	2,20	0,05		900	S ₂₀ -21	30,28	30,25	0,56		900	S ₂₀ -21	16,76	17,01	0,35
		S ₂₀ -22	2,18					S ₂₀ -22	31,14					S ₂₀ -22	17,58		
		S ₂₀ -23	2,21					S ₂₀ -23	30,21					S ₂₀ -23	17,06		
		S ₂₀ -24	2,13					S ₂₀ -24	29,64					S ₂₀ -24	16,70		
		S ₂₀ -25	2,26					S ₂₀ -25	30,00					S ₂₀ -25	16,93		
	950	S ₂₀ -31	3,25	3,22	0,06		950	S ₂₀ -31	28,36	28,79	0,31		950	S ₂₀ -31	15,35	15,64	0,22
		S ₂₀ -32	3,29					S ₂₀ -32	29,17					S ₂₀ -32	15,92		
		S ₂₀ -33	3,14					S ₂₀ -33	28,94					S ₂₀ -33	15,57		
		S ₂₀ -34	3,25					S ₂₀ -34	28,88					S ₂₀ -34	15,79		
		S ₂₀ -35	3,19					S ₂₀ -35	28,62					S ₂₀ -35	15,57		
	1000	S ₂₀ -41	5,58	5,39	0,16		1000	S ₂₀ -41	20,48	21,02	0,82		1000	S ₂₀ -41	10,17	10,52	0,47
		S ₂₀ -42	5,50					S ₂₀ -42	21,02					S ₂₀ -42	10,57		
		S ₂₀ -43	5,44					S ₂₀ -43	20,00					S ₂₀ -43	9,95		
		S ₂₀ -44	5,26					S ₂₀ -44	21,57					S ₂₀ -44	10,83		
		S ₂₀ -45	5,20					S ₂₀ -45	22,05					S ₂₀ -45	11,09		
	1100	S ₂₀ -51	7,69	7,69	0,04		1100	S ₂₀ -51	17,59	17,08	0,55		1100	S ₂₀ -51	8,50	8,11	0,34
		S ₂₀ -52	7,74					S ₂₀ -52	16,74					S ₂₀ -52	7,88		
		S ₂₀ -53	7,67					S ₂₀ -53	16,35					S ₂₀ -53	7,69		
		S ₂₀ -54	7,64					S ₂₀ -54	17,63					S ₂₀ -54	8,38		
		S ₂₀ -55	7,71					S ₂₀ -55	17,08					S ₂₀ -55	8,07		
	1200	S ₂₀ -61	9,55	9,52	0,07		1200	S ₂₀ -61	0,24	0,29	0,26		1200	S ₂₀ -61	0,10	0,12	0,11
		S ₂₀ -62	9,62					S ₂₀ -62	0,00					S ₂₀ -62	0,00		
		S ₂₀ -63	9,43					S ₂₀ -63	0,71					S ₂₀ -63	0,29		
		S ₂₀ -64	9,48					S ₂₀ -64	0,24					S ₂₀ -64	0,10		
		S ₂₀ -65	9,53					S ₂₀ -65	0,24					S ₂₀ -65	0,10		

ENSAIO DE PERDA AO FOGO - PF						ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE - MEA						ENSAIO DE TENSÃO DE RUPTURA à FLEXÃO - TRF					
Formulação	T (°C)	Código	PF (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	MEA (g/cm ³)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	TRF (MPa)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
S ₂₀	850	S ₂₀ -11	11,16	11,61	0,40	S ₂₀	850	S ₂₀ -11	1,76	1,75	0,01	S ₂₀	850	S ₂₀ -11	12,85	12,81	0,07
		S ₂₀ -12	11,38					S ₂₀ -12	1,75					S ₂₀ -12	12,73		
		S ₂₀ -13	12,23					S ₂₀ -13	1,75					S ₂₀ -13	12,86		
		S ₂₀ -14	11,67					S ₂₀ -14	1,76					S ₂₀ -14			
		S ₂₀ -15	11,61					S ₂₀ -15	1,74					S ₂₀ -15			
	900	S ₂₀ -21	9,04	9,06	0,11		900	S ₂₀ -21	1,81	1,78	0,02		900	S ₂₀ -21	12,92	12,87	0,05
		S ₂₀ -22	9,22					S ₂₀ -22	1,77					S ₂₀ -22	12,86		
		S ₂₀ -23	9,09					S ₂₀ -23	1,77					S ₂₀ -23	12,83		
		S ₂₀ -24	8,98					S ₂₀ -24	1,77					S ₂₀ -24			
		S ₂₀ -25	8,95					S ₂₀ -25	1,77					S ₂₀ -25			
	950	S ₂₀ -31	9,53	9,56	0,08		950	S ₂₀ -31	1,85	1,84	0,01		950	S ₂₀ -31	13,72	13,72	0,07
		S ₂₀ -32	9,65					S ₂₀ -32	1,83					S ₂₀ -32	13,79		
		S ₂₀ -33	9,62					S ₂₀ -33	1,86					S ₂₀ -33	13,66		
		S ₂₀ -34	9,55					S ₂₀ -34	1,83					S ₂₀ -34			
		S ₂₀ -35	9,46					S ₂₀ -35	1,84					S ₂₀ -35			
	1000	S ₂₀ -41	10,12	9,99	0,14		1000	S ₂₀ -41	2,01	2,00	0,01		1000	S ₂₀ -41	36,88	36,82	0,06
		S ₂₀ -42	10,04					S ₂₀ -42	1,99					S ₂₀ -42	36,79		
		S ₂₀ -43	9,78					S ₂₀ -43	2,01					S ₂₀ -43	36,78		
		S ₂₀ -44	10,09					S ₂₀ -44	1,99					S ₂₀ -44			
		S ₂₀ -45	9,90					S ₂₀ -45	1,99					S ₂₀ -45			
	1100	S ₂₀ -51	10,60	10,45	0,20		1100	S ₂₀ -51	2,07	2,11	0,02		1100	S ₂₀ -51	54,21	54,12	0,13
		S ₂₀ -52	10,34					S ₂₀ -52	2,12					S ₂₀ -52	53,97		
		S ₂₀ -53	10,34					S ₂₀ -53	2,13					S ₂₀ -53	54,18		
		S ₂₀ -54	10,27					S ₂₀ -54	2,10					S ₂₀ -54			
		S ₂₀ -55	10,72					S ₂₀ -55	2,12					S ₂₀ -55			
	1200	S ₂₀ -61	9,85	10,24	0,28		1200	S ₂₀ -61	2,44	2,44	0,02		1200	S ₂₀ -61	61,66	62,15	0,43
		S ₂₀ -62	10,50					S ₂₀ -62	2,46					S ₂₀ -62	62,48		
		S ₂₀ -63	10,21					S ₂₀ -63	2,42					S ₂₀ -63	62,32		
		S ₂₀ -64	10,12					S ₂₀ -64	2,44					S ₂₀ -64			
		S ₂₀ -65	10,51					S ₂₀ -65	2,46					S ₂₀ -65			

9 – Ensaio Tecnológico de Propriedades Físico-Mecânicas – FORMULAÇÃO S₃₀

	Amostras	MEDIDAS ANTES DA QUEIMA			MEDIDAS APÓS A QUEIMA				
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Massa úmida (g) - 24h	Massa imersa (g)
850°C	S ₃₀ -11	60,79	20,13	11,79	59,71	19,80	10,54	12,51	6,31
	S ₃₀ -12	60,74	20,24	11,80	59,68	19,86	10,55	12,43	6,47
	S ₃₀ -13	60,75	20,24	11,77	59,69	19,76	10,52	12,44	6,34
	S ₃₀ -14	60,79	20,26	11,81	59,66	19,75	10,53	12,44	6,32
	S ₃₀ -15	60,81	20,25	11,81	59,69	19,88	10,55	12,45	6,36
900°C	S ₃₀ -21	60,64	20,10	11,35	59,61	19,74	10,41	12,14	6,32
	S ₃₀ -22	60,63	20,11	11,35	59,53	19,81	10,39	12,14	6,35
	S ₃₀ -23	60,66	20,08	11,40	59,57	19,82	10,41	12,16	6,36
	S ₃₀ -24	60,69	20,10	11,37	59,61	19,84	10,39	12,19	6,39
	S ₃₀ -25	60,68	20,08	11,41	59,59	19,77	10,44	12,20	6,41
950°C	S ₃₀ -31	60,61	20,08	11,31	58,99	19,52	10,29	11,87	6,27
	S ₃₀ -32	60,62	20,10	11,31	58,98	19,49	10,29	11,89	6,24
	S ₃₀ -33	60,63	20,10	11,34	58,98	19,50	10,30	11,92	6,32
	S ₃₀ -34	60,59	20,14	11,23	59,07	19,51	10,21	11,83	6,29
	S ₃₀ -35	60,61	20,06	11,30	59,06	19,52	10,29	11,93	6,32
1000°C	S ₃₀ -41	60,63	20,08	11,31	58,15	19,34	10,20	11,38	6,12
	S ₃₀ -42	60,65	20,13	11,31	58,00	19,29	10,19	11,35	6,14
	S ₃₀ -43	60,65	20,12	11,31	57,97	19,35	10,23	11,34	6,18
	S ₃₀ -44	60,63	20,10	11,31	57,99	19,31	10,22	11,37	6,23
	S ₃₀ -45	60,64	20,12	11,39	58,07	19,31	10,27	11,39	6,15
1100°C	S ₃₀ -51	60,64	20,08	11,41	56,59	18,47	10,28	11,09	6,26
	S ₃₀ -52	60,63	20,08	11,38	56,71	18,51	10,24	11,13	6,25
	S ₃₀ -53	60,61	20,09	11,42	56,57	18,48	10,32	11,10	6,28
	S ₃₀ -54	60,62	20,07	11,39	56,55	18,51	10,27	11,13	6,23
	S ₃₀ -55	60,64	20,10	11,42	56,67	18,53	10,32	11,20	6,32
1200°C	S ₃₀ -61	60,35	19,79	11,36	56,08	18,67	10,28	10,28	5,80
	S ₃₀ -62	60,30	19,78	11,41	55,97	18,50	10,27	10,30	5,83
	S ₃₀ -63	60,33	19,75	11,36	55,79	18,54	10,28	10,29	5,86
	S ₃₀ -64	60,34	19,79	11,35	55,74	18,48	10,28	10,30	5,90
	S ₃₀ -65	60,28	19,79	11,37	55,58	18,25	10,26	10,27	5,96

	Amostras	$RLq = \frac{Cs - Cq}{Cq} \times 100$	$PA = \frac{Mu - Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$AA = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100$	$PF = \frac{Ms - Mq}{Mq} \times 100$	$MEA = \frac{Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$TRF = \frac{3PL}{2bh^2}$
		RL (%)	PA (%)	AA (%)	PF (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (MPa)
850°C	S ₃₀ -11	1,78	31,77	18,69	10,60	1,7	12,92
	S ₃₀ -12	1,75	31,54	17,82	10,59	1,77	13,11
	S ₃₀ -13	1,74	31,48	18,25	10,62	1,72	13,24
	S ₃₀ -14	1,86	31,21	18,14	10,84	1,72	
	S ₃₀ -15	1,84	31,20	18,01	10,67	1,73	
900°C	S ₃₀ -21	1,70	29,73	16,62	8,28	1,79	13,21
	S ₃₀ -22	1,81	30,22	16,84	8,46	1,79	13,25
	S ₃₀ -23	1,80	30,17	16,81	8,68	1,79	13,22
	S ₃₀ -24	1,78	31,03	17,32	8,62	1,79	
	S ₃₀ -25	1,80	30,40	16,86	8,50	1,80	
950°C	S ₃₀ -31	2,67	28,21	15,35	9,02	1,84	18,93
	S ₃₀ -32	2,71	28,32	15,55	9,02	1,82	19,14
	S ₃₀ -33	2,72	28,93	15,73	9,17	1,84	20,02
	S ₃₀ -34	2,51	29,24	15,87	9,08	1,84	
	S ₃₀ -35	2,56	29,23	15,94	8,94	1,83	
1000°C	S ₃₀ -41	4,09	22,43	11,57	9,81	1,94	52,3
	S ₃₀ -42	4,37	22,26	11,38	9,90	1,96	51,96
	S ₃₀ -43	4,42	21,51	10,85	9,55	1,98	52,33
	S ₃₀ -44	4,35	22,37	11,25	9,64	1,99	
	S ₃₀ -45	4,24	21,37	10,91	9,83	1,96	
1100°C	S ₃₀ -51	6,68	16,77	7,88	9,90	2,13	56,95
	S ₃₀ -52	6,47	18,24	8,69	10,02	2,10	58,21
	S ₃₀ -53	6,67	16,18	7,56	9,63	2,14	58,13
	S ₃₀ -54	6,71	17,55	8,37	9,83	2,10	
	S ₃₀ -55	6,55	18,03	8,53	9,63	2,11	
1200°C	S ₃₀ -61	7,08	0,00	0,00	9,51	2,29	64,66
	S ₃₀ -62	7,18	0,67	0,29	9,99	2,30	65,81
	S ₃₀ -63	7,53	0,23	0,10	9,51	2,32	65,95
	S ₃₀ -64	7,62	0,45	0,19	9,43	2,34	
	S ₃₀ -65	7,80	0,23	0,10	9,76	2,38	

ENSAIO DE RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA - RLq						ENSAIO DE POROSIDADE APARENTE - PA						ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA- AA					
Formulação	T (°C)	Código	RLq (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	PA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	AA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
S ₃₀	850	S ₃₀ -11	1,78	1,79	0,05	S ₃₀	850	S ₃₀ -11	31,77	31,44	0,24	S ₃₀	850	S ₃₀ -11	18,69	18,18	0,33
		S ₃₀ -12	1,75					S ₃₀ -12	31,54					S ₃₀ -12	17,82		
		S ₃₀ -13	1,74					S ₃₀ -13	31,48					S ₃₀ -13	18,25		
		S ₃₀ -14	1,86					S ₃₀ -14	31,21					S ₃₀ -14	18,14		
		S ₃₀ -15	1,84					S ₃₀ -15	31,20					S ₃₀ -15	18,01		
	900	S ₃₀ -21	1,70	1,78	0,05		900	S ₃₀ -21	29,73	30,31	0,47		900	S ₃₀ -21	16,62	16,89	0,26
		S ₃₀ -22	1,81					S ₃₀ -22	30,22					S ₃₀ -22	16,84		
		S ₃₀ -23	1,80					S ₃₀ -23	30,17					S ₃₀ -23	16,81		
		S ₃₀ -24	1,78					S ₃₀ -24	31,03					S ₃₀ -24	17,32		
		S ₃₀ -25	1,80					S ₃₀ -25	30,40					S ₃₀ -25	16,86		
	950	S ₃₀ -31	2,67	2,63	0,09		950	S ₃₀ -31	28,21	28,79	0,49		950	S ₃₀ -31	15,35	15,69	0,24
		S ₃₀ -32	2,71					S ₃₀ -32	28,32					S ₃₀ -32	15,55		
		S ₃₀ -33	2,72					S ₃₀ -33	28,93					S ₃₀ -33	15,73		
		S ₃₀ -34	2,51					S ₃₀ -34	29,24					S ₃₀ -34	15,87		
		S ₃₀ -35	2,56					S ₃₀ -35	29,23					S ₃₀ -35	15,94		
	1000	S ₃₀ -41	4,09	4,29	0,13		1000	S ₃₀ -41	22,43	21,99	0,51		1000	S ₃₀ -41	11,57	11,19	0,31
		S ₃₀ -42	4,37					S ₃₀ -42	22,26					S ₃₀ -42	11,38		
		S ₃₀ -43	4,42					S ₃₀ -43	21,51					S ₃₀ -43	10,85		
		S ₃₀ -44	4,35					S ₃₀ -44	22,37					S ₃₀ -44	11,25		
		S ₃₀ -45	4,24					S ₃₀ -45	21,37					S ₃₀ -45	10,91		
	1100	S ₃₀ -51	6,68	6,61	0,10		1100	S ₃₀ -51	16,77	17,35	0,87		1100	S ₃₀ -51	7,88	8,21	0,47
		S ₃₀ -52	6,47					S ₃₀ -52	18,24					S ₃₀ -52	8,69		
		S ₃₀ -53	6,67					S ₃₀ -53	16,18					S ₃₀ -53	7,56		
		S ₃₀ -54	6,71					S ₃₀ -54	17,55					S ₃₀ -54	8,37		
S ₃₀ -55		6,55	S ₃₀ -55			18,03		S ₃₀ -55	8,53								
1200	S ₃₀ -61	7,08	7,44	0,30	1200	S ₃₀ -61	0,00	0,32	0,26	1200	S ₃₀ -61	0,00	0,14	0,11			
	S ₃₀ -62	7,18				S ₃₀ -62	0,67				S ₃₀ -62	0,29					
	S ₃₀ -63	7,53				S ₃₀ -63	0,23				S ₃₀ -63	0,10					
	S ₃₀ -64	7,62				S ₃₀ -64	0,45				S ₃₀ -64	0,19					
	S ₃₀ -65	7,80				S ₃₀ -65	0,23				S ₃₀ -65	0,10					

ENSAIO DE PERDA AO FOGO - PF						ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE - MEA						ENSAIO DE TENSÃO DE RUPTURA à FLEXÃO - TRF					
Formulação	T (°C)	Código	PF (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	MEA (g/cm ³)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	TRF (MPa)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
S ₃₀	850	S ₃₀ -11	10,60	10,66	0,10	S ₃₀	850	S ₃₀ -11	1,70	1,73	0,03	S ₃₀	850	S ₃₀ -11	12,92	13,09	0,16
		S ₃₀ -12	10,59					S ₃₀ -12	1,77					S ₃₀ -12	13,11		
		S ₃₀ -13	10,62					S ₃₀ -13	1,72					S ₃₀ -13	13,24		
		S ₃₀ -14	10,84					S ₃₀ -14	1,72					S ₃₀ -14			
		S ₃₀ -15	10,67					S ₃₀ -15	1,73					S ₃₀ -15			
	900	S ₃₀ -21	8,28	8,51	0,16		900	S ₃₀ -21	1,79	1,79	0,01		900	S ₃₀ -21	13,21	13,23	0,02
		S ₃₀ -22	8,46					S ₃₀ -22	1,79					S ₃₀ -22	13,25		
		S ₃₀ -23	8,68					S ₃₀ -23	1,79					S ₃₀ -23	13,22		
		S ₃₀ -24	8,62					S ₃₀ -24	1,79					S ₃₀ -24			
		S ₃₀ -25	8,50					S ₃₀ -25	1,80					S ₃₀ -25			
	950	S ₃₀ -31	9,02	9,05	0,09		950	S ₃₀ -31	1,84	1,84	0,01		950	S ₃₀ -31	18,93	19,36	0,58
		S ₃₀ -32	9,02					S ₃₀ -32	1,82					S ₃₀ -32	19,14		
		S ₃₀ -33	9,17					S ₃₀ -33	1,84					S ₃₀ -33	20,02		
		S ₃₀ -34	9,08					S ₃₀ -34	1,84					S ₃₀ -34			
		S ₃₀ -35	8,94					S ₃₀ -35	1,83					S ₃₀ -35			
	1000	S ₃₀ -41	9,81	9,75	0,15		1000	S ₃₀ -41	1,94	1,97	0,02		1000	S ₃₀ -41	52,30	52,20	0,21
		S ₃₀ -42	9,90					S ₃₀ -42	1,96					S ₃₀ -42	51,96		
		S ₃₀ -43	9,55					S ₃₀ -43	1,98					S ₃₀ -43	52,33		
		S ₃₀ -44	9,64					S ₃₀ -44	1,99					S ₃₀ -44			
		S ₃₀ -45	9,83					S ₃₀ -45	1,96					S ₃₀ -45			
	1100	S ₃₀ -51	9,90	9,80	0,17		1100	S ₃₀ -51	2,13	2,12	0,02		1100	S ₃₀ -51	56,95	57,76	0,71
		S ₃₀ -52	10,02					S ₃₀ -52	2,10					S ₃₀ -52	58,21		
		S ₃₀ -53	9,63					S ₃₀ -53	2,14					S ₃₀ -53	58,13		
		S ₃₀ -54	9,83					S ₃₀ -54	2,10					S ₃₀ -54			
S ₃₀ -55		9,63	S ₃₀ -55			2,11		S ₃₀ -55									
1200	S ₃₀ -61	9,51	9,64	0,23	1200	S ₃₀ -61	2,29	2,33	0,04	1200	S ₃₀ -61	64,66	65,47	0,71			
	S ₃₀ -62	9,99				S ₃₀ -62	2,30				S ₃₀ -62	65,81					
	S ₃₀ -63	9,51				S ₃₀ -63	2,32				S ₃₀ -63	65,95					
	S ₃₀ -64	9,43				S ₃₀ -64	2,34				S ₃₀ -64						
	S ₃₀ -65	9,76				S ₃₀ -65	2,38				S ₃₀ -65						

10 - Ensaios Tecnológicos de Propriedades Físico-Mecânicas – FORMULAÇÃO S₄₀

	Amostras	MEDIDAS ANTES DA QUEIMA			MEDIDAS APÓS A QUEIMA				
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Massa úmida (g) - 24h	Massa imersa (g)
850°C	S ₄₀ -11	60,77	20,26	11,77	59,88	19,81	10,65	12,53	6,61
	S ₄₀ -12	60,75	20,24	11,75	59,92	19,95	10,62	12,44	6,60
	S ₄₀ -13	60,82	20,25	11,80	59,96	19,88	10,67	12,51	6,59
	S ₄₀ -14	60,85	20,26	11,76	59,97	19,86	10,66	12,49	6,59
	S ₄₀ -15	60,74	20,23	11,82	59,93	19,86	10,68	12,53	6,60
900°C	S ₄₀ -21	60,65	20,11	11,34	59,85	19,93	10,45	12,31	6,43
	S ₄₀ -22	60,67	20,11	11,44	59,98	19,97	10,59	12,38	6,49
	S ₄₀ -23	60,66	20,11	11,44	59,95	19,94	10,55	12,36	6,55
	S ₄₀ -24	60,67	20,15	11,43	59,94	19,98	10,55	12,36	6,53
	S ₄₀ -25	60,66	20,09	11,48	59,85	19,93	10,53	12,39	6,53
950°C	S ₄₀ -31	60,70	20,14	11,35	59,36	19,66	10,39	12,06	6,43
	S ₄₀ -32	60,69	20,08	11,40	59,37	19,69	10,42	12,11	6,48
	S ₄₀ -33	60,70	20,10	11,37	59,37	19,64	10,39	12,08	6,43
	S ₄₀ -34	60,71	20,10	11,37	59,37	19,68	10,40	12,09	6,48
	S ₄₀ -35	60,67	20,13	11,37	59,35	19,65	10,41	12,08	6,45
1000°C	S ₄₀ -41	60,67	20,11	11,35	59,08	19,59	10,37	11,78	6,40
	S ₄₀ -42	60,68	20,10	11,41	59,07	19,57	10,45	11,69	6,38
	S ₄₀ -43	60,65	20,17	11,36	58,93	19,55	10,36	11,72	6,33
	S ₄₀ -44	60,67	20,16	11,39	58,92	19,55	10,37	11,73	6,36
	S ₄₀ -45	60,67	20,11	11,38	58,94	19,51	10,36	11,66	6,32
1100°C	S ₄₀ -51	60,70	20,13	11,53	57,06	18,70	10,42	11,38	6,33
	S ₄₀ -52	60,71	20,09	11,46	56,97	18,63	10,36	11,21	6,31
	S ₄₀ -53	60,71	20,10	11,52	56,87	18,57	10,48	11,18	6,34
	S ₄₀ -54	60,71	20,15	11,49	56,91	18,65	10,42	11,15	6,36
	S ₄₀ -55	60,70	20,10	11,56	56,92	18,54	10,46	11,22	6,37
1200°C	S ₄₀ -61	60,34	19,77	11,45	57,28	18,98	10,53	10,57	6,04
	S ₄₀ -62	60,34	19,79	11,42	57,12	18,87	10,53	10,57	6,09
	S ₄₀ -63	60,36	19,78	11,41	57,04	18,88	10,49	10,53	6,10
	S ₄₀ -64	60,38	19,78	11,43	56,92	19,02	10,50	10,58	6,08
	S ₄₀ -65	60,34	19,79	11,44	56,98	19,02	10,55	10,58	6,21

	Amostras	$RLq = \frac{Cs - Cq}{Cq} \times 100$	$PA = \frac{Mu - Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$AA = \frac{Ms - Ms}{Ms} \times 100$	$PF = \frac{Ms - Mq}{Mq} \times 100$	$MEA = \frac{Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$TRF = \frac{3PL}{2bh^2}$
		RL (%)	PA (%)	AA (%)	PF (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (MPa)
850°C	S ₄₀ -11	1,46	31,76	17,65	9,52	1,80	11,21
	S ₄₀ -12	1,37	31,16	17,14	9,62	1,82	10,98
	S ₄₀ -13	1,41	31,08	17,24	9,58	1,80	11,23
	S ₄₀ -14	1,45	31,02	17,17	9,35	1,81	
	S ₄₀ -15	1,33	31,20	17,32	9,64	1,80	
900°C	S ₄₀ -21	1,32	31,63	17,80	7,85	1,78	11,71
	S ₄₀ -22	1,14	30,39	16,90	7,43	1,80	11,78
	S ₄₀ -23	1,17	31,15	17,16	7,78	1,82	11,63
	S ₄₀ -24	1,20	31,05	17,16	7,70	1,81	
	S ₄₀ -25	1,34	31,74	17,66	8,28	1,80	
950°C	S ₄₀ -31	2,21	29,66	16,07	8,46	1,85	16,39
	S ₄₀ -32	2,17	30,02	16,22	8,60	1,85	16,25
	S ₄₀ -33	2,19	29,91	16,27	8,62	1,84	16,31
	S ₄₀ -34	2,21	30,12	16,25	8,53	1,85	
	S ₄₀ -35	2,18	29,66	16,04	8,44	1,85	
1000°C	S ₄₀ -41	2,62	26,21	13,60	8,63	1,93	56,03
	S ₄₀ -42	2,65	23,35	11,87	8,41	1,97	56,17
	S ₄₀ -43	2,84	25,23	13,13	8,80	1,92	55,99
	S ₄₀ -44	2,88	25,33	13,11	8,96	1,93	
	S ₄₀ -45	2,85	24,34	12,55	8,96	1,94	
1100°C	S ₄₀ -51	6,00	19,01	9,21	9,63	2,06	61,22
	S ₄₀ -52	6,16	17,35	8,20	9,60	2,11	60,81
	S ₄₀ -53	6,33	14,46	6,68	9,03	2,17	60,83
	S ₄₀ -54	6,26	15,24	7,01	9,31	2,18	
	S ₄₀ -55	6,23	15,67	7,27	9,52	2,16	
1200°C	S ₄₀ -61	5,07	0,88	0,38	8,03	2,32	82,54
	S ₄₀ -62	5,34	0,89	0,38	7,79	2,35	83,15
	S ₄₀ -63	5,50	0,90	0,38	8,06	2,37	84,61
	S ₄₀ -64	5,73	1,78	0,76	8,14	2,33	
	S ₄₀ -65	5,57	0,69	0,28	7,78	2,41	

ENSAIO DE PERDA AO FOGO - PF						ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE - MEA						ENSAIO DE TENSÃO DE RUPTURA à FLEXÃO - TRF					
Formulação	T (°C)	Código	PF (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	MEA (g/cm ³)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	TRF (MPa)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
S ₄₀	850	S ₄₀ -11	9,52	9,54	0,12	S ₄₀	850	S ₄₀ -11	1,80	1,81	0,01	S ₄₀	850	S ₄₀ -11	11,21	11,14	0,14
		S ₄₀ -12	9,62					S ₄₀ -12	1,82					S ₄₀ -12	10,98		
		S ₄₀ -13	9,58					S ₄₀ -13	1,80					S ₄₀ -13	11,23		
		S ₄₀ -14	9,35					S ₄₀ -14	1,81					S ₄₀ -14			
		S ₄₀ -15	9,64					S ₄₀ -15	1,80					S ₄₀ -15			
	900	S ₄₀ -21	7,85	7,81	0,31		900	S ₄₀ -21	1,78	1,80	0,01		900	S ₄₀ -21	11,71	11,71	0,08
		S ₄₀ -22	7,43					S ₄₀ -22	1,80					S ₄₀ -22	11,78		
		S ₄₀ -23	7,78					S ₄₀ -23	1,82					S ₄₀ -23	11,63		
		S ₄₀ -24	7,70					S ₄₀ -24	1,81					S ₄₀ -24			
		S ₄₀ -25	8,28					S ₄₀ -25	1,80					S ₄₀ -25			
	950	S ₄₀ -31	8,46	8,53	0,08		950	S ₄₀ -31	1,85	1,85	0,01		950	S ₄₀ -31	16,39	16,32	0,07
		S ₄₀ -32	8,60					S ₄₀ -32	1,85					S ₄₀ -32	16,25		
		S ₄₀ -33	8,62					S ₄₀ -33	1,84					S ₄₀ -33	16,31		
		S ₄₀ -34	8,53					S ₄₀ -34	1,85					S ₄₀ -34			
		S ₄₀ -35	8,44					S ₄₀ -35	1,85					S ₄₀ -35			
	1000	S ₄₀ -41	8,63	8,75	0,23		1000	S ₄₀ -41	1,93	1,94	0,02		1000	S ₄₀ -41	56,03	56,06	0,09
		S ₄₀ -42	8,41					S ₄₀ -42	1,97					S ₄₀ -42	56,17		
		S ₄₀ -43	8,80					S ₄₀ -43	1,92					S ₄₀ -43	55,99		
		S ₄₀ -44	8,96					S ₄₀ -44	1,93					S ₄₀ -44			
		S ₄₀ -45	8,96					S ₄₀ -45	1,94					S ₄₀ -45			
	1100	S ₄₀ -51	9,63	9,42	0,25		1100	S ₄₀ -51	2,06	2,14	0,05		1100	S ₄₀ -51	61,22	60,95	0,23
		S ₄₀ -52	9,60					S ₄₀ -52	2,11					S ₄₀ -52	60,81		
		S ₄₀ -53	9,03					S ₄₀ -53	2,17					S ₄₀ -53	60,83		
		S ₄₀ -54	9,31					S ₄₀ -54	2,18					S ₄₀ -54			
		S ₄₀ -55	9,52					S ₄₀ -55	2,16					S ₄₀ -55			
	1200	S ₄₀ -61	8,03	7,96	0,16		1200	S ₄₀ -61	2,32	2,36	0,04		1200	S ₄₀ -61	82,54	83,43	1,06
		S ₄₀ -62	7,79					S ₄₀ -62	2,35					S ₄₀ -62	83,15		
		S ₄₀ -63	8,06					S ₄₀ -63	2,37					S ₄₀ -63	84,61		
		S ₄₀ -64	8,14					S ₄₀ -64	2,33					S ₄₀ -64			
		S ₄₀ -65	7,78					S ₄₀ -65	2,41					S ₄₀ -65			

ENSAIO DE RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA - RLq						ENSAIO DE POROSIDADE APARENTE - PA						ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA - AA					
Formulação	T (°C)	Código	RLq (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	PA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	AA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
S ₄₀	850	S ₄₀ -11	1,46	1,40	0,05	S ₄₀	850	S ₄₀ -11	31,76	31,24	0,30	S ₄₀	850	S ₄₀ -11	17,65	17,30	0,21
		S ₄₀ -12	1,37					S ₄₀ -12	31,16					S ₄₀ -12	17,14		
		S ₄₀ -13	1,41					S ₄₀ -13	31,08					S ₄₀ -13	17,24		
		S ₄₀ -14	1,45					S ₄₀ -14	31,02					S ₄₀ -14	17,17		
		S ₄₀ -15	1,33					S ₄₀ -15	31,20					S ₄₀ -15	17,32		
	900	S ₄₀ -21	1,32	1,23	0,09		900	S ₄₀ -21	31,63	31,19	0,54		900	S ₄₀ -21	17,80	17,34	0,38
		S ₄₀ -22	1,14					S ₄₀ -22	30,39					S ₄₀ -22	16,90		
		S ₄₀ -23	1,17					S ₄₀ -23	31,15					S ₄₀ -23	17,16		
		S ₄₀ -24	1,20					S ₄₀ -24	31,05					S ₄₀ -24	17,16		
		S ₄₀ -25	1,34					S ₄₀ -25	31,74					S ₄₀ -25	17,66		
	950	S ₄₀ -31	2,21	2,19	0,02		950	S ₄₀ -31	29,66	29,88	0,21		950	S ₄₀ -31	16,07	16,17	0,10
		S ₄₀ -32	2,17					S ₄₀ -32	30,02					S ₄₀ -32	16,22		
		S ₄₀ -33	2,19					S ₄₀ -33	29,91					S ₄₀ -33	16,27		
		S ₄₀ -34	2,21					S ₄₀ -34	30,12					S ₄₀ -34	16,25		
		S ₄₀ -35	2,18					S ₄₀ -35	29,66					S ₄₀ -35	16,04		
	1000	S ₄₀ -41	2,62	2,77	0,12		1000	S ₄₀ -41	26,21	24,89	1,08		1000	S ₄₀ -41	13,60	12,85	0,66
		S ₄₀ -42	2,65					S ₄₀ -42	23,35					S ₄₀ -42	11,87		
		S ₄₀ -43	2,84					S ₄₀ -43	25,23					S ₄₀ -43	13,13		
		S ₄₀ -44	2,88					S ₄₀ -44	25,33					S ₄₀ -44	13,11		
		S ₄₀ -45	2,85					S ₄₀ -45	24,34					S ₄₀ -45	12,55		
	1100	S ₄₀ -51	6,00	6,19	0,13		1100	S ₄₀ -51	19,01	16,35	1,83		1100	S ₄₀ -51	9,21	7,67	1,03
		S ₄₀ -52	6,16					S ₄₀ -52	17,35					S ₄₀ -52	8,20		
		S ₄₀ -53	6,33					S ₄₀ -53	14,46					S ₄₀ -53	6,68		
		S ₄₀ -54	6,26					S ₄₀ -54	15,24					S ₄₀ -54	7,01		
		S ₄₀ -55	6,23					S ₄₀ -55	15,67					S ₄₀ -55	7,27		
	1200	S ₄₀ -61	5,07	5,44	0,25		1200	S ₄₀ -61	0,88	1,03	0,43		1200	S ₄₀ -61	0,38	0,44	0,19
		S ₄₀ -62	5,34					S ₄₀ -62	0,89					S ₄₀ -62	0,38		
		S ₄₀ -63	5,50					S ₄₀ -63	0,90					S ₄₀ -63	0,38		
		S ₄₀ -64	5,73					S ₄₀ -64	1,78					S ₄₀ -64	0,76		
		S ₄₀ -65	5,57					S ₄₀ -65	0,69					S ₄₀ -65	0,28		

11 - Ensaios Tecnológicos de Propriedades Físico-Mecânicas – FORMULAÇÃO S₅₀

		$RLq = \frac{Cs - Cq}{Cq} \times 100$	$PA = \frac{Mu - Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$AA = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100$	$PF = \frac{Ms - Mq}{Mq} \times 100$	$MEA = \frac{Mq}{Mu - Mi} \times 100$	$TRF = \frac{3PL}{2bh^2}$
Amostras		RL (%)	PA (%)	AA (%)	PF (%)	MEA (g/cm ³)	TRF (MPa)
850°C	S ₅₀ -11	1,07	31,09	17,10	8,31	1,82	9,75
	S ₅₀ -12	1,08	30,43	16,76	8,12	1,82	9,89
	S ₅₀ -13	1,00	30,05	16,59	8,13	1,81	9,73
	S ₅₀ -14	1,10	29,70	16,62	8,14	1,79	
	S ₅₀ -15	0,95	30,63	17,11	8,31	1,79	
900°C	S ₅₀ -21	1,07	30,66	16,84	6,96	1,82	9,94
	S ₅₀ -22	1,04	31,05	16,93	6,96	1,83	9,8
	S ₅₀ -23	0,96	30,22	16,53	6,78	1,83	10,11
	S ₅₀ -24	0,97	29,66	16,40	6,73	1,81	
	S ₅₀ -25	0,94	29,35	16,00	6,60	1,83	
950°C	S ₅₀ -31	1,53	28,83	15,27	7,34	1,89	10,12
	S ₅₀ -32	1,70	27,92	15,07	7,01	1,85	10,21
	S ₅₀ -33	1,58	28,82	15,47	7,42	1,86	10,14
	S ₅₀ -34	1,66	30,27	16,24	7,55	1,86	
	S ₅₀ -35	1,55	29,93	16,31	7,42	1,84	
1000°C	S ₅₀ -41	2,29	26,45	13,90	8,22	1,90	59,7
	S ₅₀ -42	2,21	26,19	13,67	8,57	1,92	60,23
	S ₅₀ -43	2,24	27,16	14,41	8,63	1,88	60,12
	S ₅₀ -44	2,35	27,40	14,44	8,81	1,90	
	S ₅₀ -45	2,29	25,90	13,75	8,72	1,88	
1100°C	S ₅₀ -51	5,35	16,30	7,63	8,93	2,13	62,34
	S ₅₀ -52	4,78	18,15	8,75	8,60	2,07	64,18
	S ₅₀ -53	4,71	17,75	8,53	8,42	2,08	62,69
	S ₅₀ -54	4,61	18,66	9,03	8,76	2,07	
	S ₅₀ -55	4,33	19,49	9,51	8,52	2,05	
1200°C	S ₅₀ -61	6,39	1,13	0,48	9,97	2,36	84,25
	S ₅₀ -62	6,11	0,23	0,10	9,57	2,36	85,13
	S ₅₀ -63	6,01	0,45	0,19	9,90	2,31	86,59
	S ₅₀ -64	5,91	0,45	0,19	9,57	2,33	
	S ₅₀ -65	6,29	0,45	0,19	9,96	2,35	

	Amostras	MEDIDAS ANTES DA QUEIMA			MEDIDAS APÓS A QUEIMA				
		Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa seca (g)	Massa úmida (g) - 24h	Massa imersa (g)
850°C	S ₅₀ -11	60,85	20,25	11,80	60,20	20,02	10,82	12,67	6,72
	S ₅₀ -12	60,85	20,23	11,82	60,19	19,91	10,86	12,68	6,70
	S ₅₀ -13	60,82	20,24	11,81	60,21	19,97	10,85	12,65	6,66
	S ₅₀ -14	60,80	20,26	11,79	60,13	19,99	10,83	12,63	6,57
	S ₅₀ -15	60,77	20,26	11,79	60,19	20,05	10,81	12,66	6,62
900°C	S ₅₀ -21	60,71	20,21	11,49	60,06	19,93	10,69	12,49	6,62
	S ₅₀ -22	60,73	20,25	11,49	60,10	19,93	10,69	12,50	6,67
	S ₅₀ -23	60,69	20,23	11,36	60,11	19,97	10,59	12,34	6,55
	S ₅₀ -24	60,71	20,21	11,44	60,12	19,99	10,67	12,42	6,52
	S ₅₀ -25	60,76	20,21	11,51	60,19	19,95	10,75	12,47	6,61
950°C	S ₅₀ -31	60,72	20,10	11,45	59,79	19,74	10,61	12,23	6,61
	S ₅₀ -32	60,74	20,10	11,42	59,71	19,78	10,62	12,22	6,49
	S ₅₀ -33	60,71	20,10	11,45	59,75	19,71	10,60	12,24	6,55
	S ₅₀ -34	60,72	20,18	11,39	59,71	19,78	10,53	12,24	6,59
	S ₅₀ -35	60,72	20,19	11,46	59,78	19,84	10,61	12,34	6,56
1000°C	S ₅₀ -41	60,74	20,15	11,44	59,35	19,67	10,50	11,96	6,44
	S ₅₀ -42	60,71	20,12	11,44	59,37	19,68	10,46	11,89	6,43
	S ₅₀ -43	60,72	20,15	11,47	59,36	19,72	10,48	11,99	6,43
	S ₅₀ -44	60,74	20,12	11,47	59,31	19,65	10,46	11,97	6,46
	S ₅₀ -45	60,75	20,14	11,47	59,36	19,68	10,47	11,91	6,35
1100°C	S ₅₀ -51	60,75	20,11	11,65	57,50	18,88	10,61	11,42	6,45
	S ₅₀ -52	60,72	20,13	11,51	57,82	18,88	10,52	11,44	6,37
	S ₅₀ -53	60,72	20,11	11,52	57,86	18,91	10,55	11,45	6,38
	S ₅₀ -54	60,72	20,10	11,53	57,92	18,93	10,52	11,47	6,38
	S ₅₀ -55	60,69	20,12	11,50	58,06	19,01	10,52	11,52	6,39
1200°C	S ₅₀ -61	60,39	19,78	11,54	56,53	18,82	10,39	10,44	6,03
	S ₅₀ -62	60,37	19,78	11,50	56,68	18,86	10,40	10,41	6,01
	S ₅₀ -63	60,40	19,79	11,51	56,77	18,84	10,37	10,39	5,91
	S ₅₀ -64	60,41	19,79	11,50	56,84	18,84	10,40	10,42	5,95
	S ₅₀ -65	60,40	19,78	11,55	56,60	18,76	10,40	10,42	6,00

ENSAIO DE RETRAÇÃO LINEAR DE QUEIMA - RLq						ENSAIO DE POROSIDADE APARENTE - PA						ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA - AA					
Formulação	T (°C)	Código	RLq (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	PA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	AA (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
S ₅₀	850	S ₅₀ -11	1,07	1,04	0,06	S ₅₀	850	S ₅₀ -11	31,09	30,38	0,53	S ₅₀	850	S ₅₀ -11	17,10	16,84	0,25
		S ₅₀ -12	1,08					S ₅₀ -12	30,43					S ₅₀ -12	16,76		
		S ₅₀ -13	1,00					S ₅₀ -13	30,05					S ₅₀ -13	16,59		
		S ₅₀ -14	1,10					S ₅₀ -14	29,70					S ₅₀ -14	16,62		
		S ₅₀ -15	0,95					S ₅₀ -15	30,63					S ₅₀ -15	17,11		
	900	S ₅₀ -21	1,07	0,99	0,06		900	S ₅₀ -21	30,66	30,19	0,70		900	S ₅₀ -21	16,84	16,54	0,37
		S ₅₀ -22	1,04					S ₅₀ -22	31,05					S ₅₀ -22	16,93		
		S ₅₀ -23	0,96					S ₅₀ -23	30,22					S ₅₀ -23	16,53		
		S ₅₀ -24	0,97					S ₅₀ -24	29,66					S ₅₀ -24	16,40		
		S ₅₀ -25	0,94					S ₅₀ -25	29,35					S ₅₀ -25	16,00		
	950	S ₅₀ -31	1,53	1,60	0,07		950	S ₅₀ -31	28,83	29,15	0,94		950	S ₅₀ -31	15,27	15,67	0,57
		S ₅₀ -32	1,70					S ₅₀ -32	27,92					S ₅₀ -32	15,07		
		S ₅₀ -33	1,58					S ₅₀ -33	28,82					S ₅₀ -33	15,47		
		S ₅₀ -34	1,66					S ₅₀ -34	30,27					S ₅₀ -34	16,24		
		S ₅₀ -35	1,55					S ₅₀ -35	29,93					S ₅₀ -35	16,31		
	1000	S ₅₀ -41	2,29	2,28	0,06		1000	S ₅₀ -41	26,45	26,62	0,64		1000	S ₅₀ -41	13,90	14,03	0,36
		S ₅₀ -42	2,21					S ₅₀ -42	26,19					S ₅₀ -42	13,67		
		S ₅₀ -43	2,24					S ₅₀ -43	27,16					S ₅₀ -43	14,41		
		S ₅₀ -44	2,35					S ₅₀ -44	27,40					S ₅₀ -44	14,44		
		S ₅₀ -45	2,29					S ₅₀ -45	25,90					S ₅₀ -45	13,75		
	1100	S ₅₀ -51	5,35	4,76	0,37		1100	S ₅₀ -51	16,30	18,07	1,19		1100	S ₅₀ -51	7,63	8,69	0,69
		S ₅₀ -52	4,78					S ₅₀ -52	18,15					S ₅₀ -52	8,75		
		S ₅₀ -53	4,71					S ₅₀ -53	17,75					S ₅₀ -53	8,53		
		S ₅₀ -54	4,61					S ₅₀ -54	18,66					S ₅₀ -54	9,03		
S ₅₀ -55		4,33	S ₅₀ -55			19,49		S ₅₀ -55	9,51								
1200	S ₅₀ -61	6,39	6,14	0,20	1200	S ₅₀ -61	1,13	0,54	0,34	1200	S ₅₀ -61	0,48	0,23	0,15			
	S ₅₀ -62	6,11				S ₅₀ -62	0,23				S ₅₀ -62	0,10					
	S ₅₀ -63	6,01				S ₅₀ -63	0,45				S ₅₀ -63	0,19					
	S ₅₀ -64	5,91				S ₅₀ -64	0,45				S ₅₀ -64	0,19					
	S ₅₀ -65	6,29				S ₅₀ -65	0,45				S ₅₀ -65	0,19					

ENSAIO DE PERDA AO FOGO - PF						ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE - MEA						ENSAIO DE TENSÃO DE RUPTURA à FLEXÃO - TRF					
Formulação	T (°C)	Código	PF (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	MEA (g/cm ³)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)	Formulação	T (°C)	Código	TRF (MPa)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO (%)
S ₅₀	850	S ₅₀ -11	8,31	8,20	0,10	S ₅₀	850	S ₅₀ -11	1,82	1,80	0,01	S ₅₀	850	S ₅₀ -11	9,75	9,79	0,09
		S ₅₀ -12	8,12					S ₅₀ -12	1,82					S ₅₀ -12	9,89		
		S ₅₀ -13	8,13					S ₅₀ -13	1,81					S ₅₀ -13	9,73		
		S ₅₀ -14	8,14					S ₅₀ -14	1,79					S ₅₀ -14			
		S ₅₀ -15	8,31					S ₅₀ -15	1,79					S ₅₀ -15			
	900	S ₅₀ -21	6,96	6,81	0,16		900	S ₅₀ -21	1,82	1,83	0,01		900	S ₅₀ -21	9,94	9,95	0,16
		S ₅₀ -22	6,96					S ₅₀ -22	1,83					S ₅₀ -22	9,80		
		S ₅₀ -23	6,78					S ₅₀ -23	1,83					S ₅₀ -23	10,11		
		S ₅₀ -24	6,73					S ₅₀ -24	1,81					S ₅₀ -24			
		S ₅₀ -25	6,60					S ₅₀ -25	1,83					S ₅₀ -25			
	950	S ₅₀ -31	7,34	7,35	0,21		950	S ₅₀ -31	1,89	1,86	0,02		950	S ₅₀ -31	10,12	10,16	0,05
		S ₅₀ -32	7,01					S ₅₀ -32	1,85					S ₅₀ -32	10,21		
		S ₅₀ -33	7,42					S ₅₀ -33	1,86					S ₅₀ -33	10,14		
		S ₅₀ -34	7,55					S ₅₀ -34	1,86					S ₅₀ -34			
		S ₅₀ -35	7,42					S ₅₀ -35	1,84					S ₅₀ -35			
	1000	S ₅₀ -41	8,22	8,59	0,23		1000	S ₅₀ -41	1,90	1,90	0,01		1000	S ₅₀ -41	59,70	60,02	0,28
		S ₅₀ -42	8,57					S ₅₀ -42	1,92					S ₅₀ -42	60,23		
		S ₅₀ -43	8,63					S ₅₀ -43	1,88					S ₅₀ -43	60,12		
		S ₅₀ -44	8,81					S ₅₀ -44	1,90					S ₅₀ -44			
		S ₅₀ -45	8,72					S ₅₀ -45	1,88					S ₅₀ -45			
	1100	S ₅₀ -51	8,93	8,65	0,20		1100	S ₅₀ -51	2,13	2,08	0,03		1100	S ₅₀ -51	62,34	63,07	0,98
		S ₅₀ -52	8,60					S ₅₀ -52	2,07					S ₅₀ -52	64,18		
		S ₅₀ -53	8,42					S ₅₀ -53	2,08					S ₅₀ -53	62,69		
		S ₅₀ -54	8,76					S ₅₀ -54	2,07					S ₅₀ -54			
S ₅₀ -55		8,52	S ₅₀ -55			2,05		S ₅₀ -55									
1200	S ₅₀ -61	9,97	9,79	0,21	1200	S ₅₀ -61	2,36	2,34	0,02	1200	S ₅₀ -61	84,25	85,32	1,18			
	S ₅₀ -62	9,57				S ₅₀ -62	2,36				S ₅₀ -62	85,13					
	S ₅₀ -63	9,90				S ₅₀ -63	2,31				S ₅₀ -63	86,59					
	S ₅₀ -64	9,57				S ₅₀ -64	2,33				S ₅₀ -64						
	S ₅₀ -65	9,96				S ₅₀ -65	2,35				S ₅₀ -65						

APÊNDICE B – COLORIMETRIA DAS FORMULAÇÕES

<i>Formulação A</i>			
<i>T (°C)</i>	<i>L*</i>	<i>a*</i>	<i>b*</i>
850	69,68	10,05	22,66
900	70,42	9,92	22,86
950	70,75	9,79	22,70
1000	70,45	10,51	24,40
1100	58,99	22,38	29,99
1200	55,78	24,98	23,43

<i>Formulação C₂₀</i>			
<i>T (°C)</i>	<i>L*</i>	<i>a*</i>	<i>b*</i>
850	67,32	13,30	22,62
900	65,97	15,97	23,17
950	67,66	16,90	25,54
1000	56,94	24,17	25,81
1100	39,44	18,44	12,69
1200	40,82	5,25	6,28

<i>Formulação S₁₀</i>			
<i>T (°C)</i>	<i>L*</i>	<i>a*</i>	<i>b*</i>
850	66,82	11,13	19,70
900	67,35	10,17	20,96
950	68,95	10,83	22,93
1000	69,10	11,63	25,54
1100	55,86	22,03	27,09
1200	50,68	7,33	11,19

<i>Formulações/ T (°C)</i>	<i>850°C</i>	<i>900°C</i>	<i>950°C</i>	<i>1000°C</i>	<i>1100°C</i>	<i>1200°C</i>
<i>C₂₀ x S₁₀</i>	3,67	6,36	6,73	17,47	22,13	11,21
<i>ΔE A x C₂₀</i>	4,02	7,51	8,26	19,26	26,40	30,12
<i>A x S₁₀</i>	4,26	3,62	1,82	2,09	4,28	22,08

